



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

GENERACIÓN DE GAS METANO MEDIANTE LA CODIGESTIÓN
ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA DE LA
CIUDAD DE MACHALA.

FEIJOO CHAVEZ VALERIA DE LOS ANGELES
INGENIERA QUÍMICA

VILLACRESES SARZOZA DIANA CAROLINA
INGENIERA QUÍMICA

MACHALA
2020



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

GENERACIÓN DE GAS METANO MEDIANTE LA CODIGESTIÓN
ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA DE
LA CIUDAD DE MACHALA.

FEIJOO CHAVEZ VALERIA DE LOS ANGELES
INGENIERA QUÍMICA

VILLACRESES SARZOZA DIANA CAROLINA
INGENIERA QUÍMICA

MACHALA
2020



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

TRABAJO TITULACIÓN
TRABAJO EXPERIMENTAL

GENERACIÓN DE GAS METANO MEDIANTE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA DE LA CIUDAD DE MACHALA.

FEIJOO CHAVEZ VALERIA DE LOS ANGELES
INGENIERA QUÍMICA

VILLACRESES SARZOZA DIANA CAROLINA
INGENIERA QUÍMICA

ROMERO BONILLA HUGO ITALO

MACHALA, 08 DE MAYO DE 2020

MACHALA
2020

GENERACIÓN DE GAS METANO MEDIANTE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA DE LA CIUDAD DE MACHALA

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

2%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

1%

2

Submitted to Universidad Continental

Trabajo del estudiante

1%

3

Submitted to Universidad Europea de Madrid

Trabajo del estudiante

1%

4

Lewis M. Gomez, Fredy Colpas-Castillo, Roberto Fernandez-Maestre. "Cation exchange for mercury and cadmium of xanthated, sulfonated, activated and non-treated subbituminous coal, commercial activated carbon and commercial synthetic resin: effect of pre-oxidation on xanthation of subbituminous coal", International Journal of Coal Science & Technology, 2014

Publicación

1%

5

Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana

Trabajo del estudiante

1%

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Las que suscriben, FEIJOO CHAVEZ VALERIA DE LOS ANGELES y VILLACRESES SARZOZA DIANA CAROLINA, en calidad de autoras del siguiente trabajo escrito titulado GENERACIÓN DE GAS METANO MEDIANTE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA DE LA CIUDAD DE MACHALA., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Las autoras declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

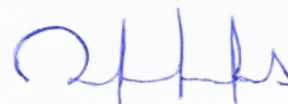
Las autoras como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 08 de mayo de 2020



FEIJOO CHAVEZ VALERIA DE LOS ANGELES
0750074882



VILLACRESES SARZOZA DIANA CAROLINA
0706018371

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico de manera especial a Dios por regalarme una vida llena de bendiciones y felicidad, a mis padres Arnecio Francisco y Sonia del Carmen por ser los pilares fundamentales de mi vida, quienes con su amor incondicional, motivación y esfuerzo me han permitido formarme en una persona con valores forjados llegando a cumplir uno de mis sueños más anhelados, ser una excelente profesional, a mi hermano Jonathan por estar siempre dispuesto cuando más lo he necesitado, a mi segunda familia, mis tíos Patricia y Jorge, mis primos Adela, Camila y Jorge Luis por brindarme apoyo, confianza y amor incondicional en todo momento, por estar pendientes de mí y expresarme siempre sus mejores deseos.

Valeria de los Ángeles Feijó Chávez

A Dios por brindarme amor, confianza y dedicación para lograr este y cada uno de mis objetivos. Les dedico este trabajo a mis padres Raúl Antonio y Betty Eva por su amor infinito, a mis hermanas Eva y Mayra por su apoyo incondicional. A todas las personas que me ayudaron de una u otra forma a lograr este objetivo.

Diana Carolina Villacreses Sarzoza

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por ser mi creador, por su amor infinito, por enseñarme a ser una persona valiente y llena de gratitud, por ser mi guía en todo momento y jamás dejarme decaer ante cualquier obstáculo que se me presente. A mis queridos padres por todo su amor, sacrificio y dedicación, velando siempre por mi bienestar y salud inculcando valores que hoy definen mi vida, gracias por apoyarme en cada decisión y permitirme cumplir cada meta que me propuesto, son mi inspiración para salir adelante y ser una mejor persona cada día. A mi hermano, primos, tíos y abuelitas gracias por su apoyo incondicional, por saber que puedo contar con ustedes en todo momento, gracias por todo su amor mi querida familia. A mi compañera de tesis Diana Villacreses por su dedicación y esfuerzo entregado para la culminación de este trabajo. A la Universidad Técnica de Machala por permitirme formarme como una excelente profesional, a los docentes de la carrera de Ingeniería Química por los conocimientos adquiridos a lo largo de mi trayecto como estudiante, en especial a mi tutor Dr. Hugo Romero por su ayuda y asesoramiento en el desarrollo de mi trabajo de titulación. A los Ing. Humberto Ayala y Wilson Carrión por su valiosa ayuda en este arduo proceso. A mis amigos y a todas las personas especiales que estuvieron a mi lado con palabras de aliento y ayuda desinteresada para hacer realidad este gran sueño.

Valeria de los Ángeles Feijó Chávez

Agradezco a Dios por ser mi guía y la luz que ilumina mi camino todos los días, dándome fortaleza, valor y por estar presente en mis pensamientos a la hora de tomar decisiones que han sido fundamentales para formarme como mujer, hija, hermana y profesional. A mi madre Betty Eva por ser mi motor, a mi padre Raúl Antonio por ser mi más grande protector, gracias por siempre esperarme con los brazos abiertos, apoyarme cuando más lo necesito, por sacarme sonrisas cuando mis días no son tan buenos, mis victorias son por y para ustedes. Agradezco a mis hermanas Eva Gabriela y Mayra Adelaide por su apoyo y por no dejarme sola cuando siento que todo se ha derrumbado, a mi pequeño Antonio José por ser una de mis razones para superarme cada día. A mis queridos amigos por demostrarme que un día gris puede llenarse de colores cuando estoy junto a ellos.

Diana Carolina Villacreses Sarzoza

RESUMEN

GENERACIÓN DE GAS METANO MEDIANTE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA DE LA CIUDAD DE MACHALA.

AUTORES:

Valeria de los Ángeles Feijoó Chávez

Diana Carolina Villacreses Sarzoza

El objetivo de la presente investigación fue producir biogás mediante codigestión anaerobia de biomasa y residuos sólidos urbanos (sedimentos), lo que permitió aprovechar estos residuos orgánicos, transformándolos en una fuente de energía renovable como el biogás. El proceso empleado de codigestión ofrece diferentes ventajas como disminuir costos procesando distintos tipos de materias primas en el biodigestor, recuperar energía de diferentes biomásas y una mejor degradación de los residuos orgánicos, obteniendo un mayor rendimiento en la obtención de biogás. La materia prima utilizada fue bagazo de caña de azúcar como biomasa, proveniente de la molinera artesanal "Don José" y los residuos sólidos urbanos del estero "El Macho" ubicados en la ciudad de Machala, Ecuador.

La metodología consistió en elaborar diferentes experimentaciones para evaluar el rendimiento de biogás en cada una de las biomásas seleccionadas. El porcentaje de CH₄ y CO₂ se determinó mediante cromatografía gaseosa, que permite la separación y cuantificación de diferentes compuestos presentes en una mezcla por medio de la adsorción, a partir de la cual se obtuvieron los siguientes resultados, cáscara de papa (35,64% CH₄), cáscara de papaya (1,64% CH₄), cáscara de piña (0,11% CH₄), cáscara de arveja (16,13% CH₄), cáscara de banano (0,39% CH₄), cáscara de haba (0,76% CH₄), bagazo de caña de azúcar (80,85% CH₄), bagazo de caña de azúcar húmedo (96,06% CH₄), bagazo de caña de azúcar semiseco (91,39% CH₄), y cáscara de papa con bagazo de caña de azúcar (58,74% CH₄). Después de la cuantificación de metano en las diferentes codigestiones, el bagazo de caña de azúcar presentó mejores resultados con un incremento del 15% en la generación de metano al realizarle un pretratamiento, que consistió en

humedecer por 24 horas la caña de azúcar triturada, lo que la convierte en una fuente de carbono efectiva para la producción de biogás debido a su alto contenido de celulosas (25 – 45%) y hemicelulosas (25 – 50%). Posteriormente se trabajó con biodigestores anaerobios que fueron adecuados en recipientes de 500 mL para las experimentaciones a escala laboratorio y recipiente de PVC con capacidad de 20 L para la experimentación a escala semipiloto en condiciones iguales, con una alimentación del 75% (sedimento, bagazo de caña de azúcar y agua 0,75:1,5:1,5) dejando libre el 25% para la aireación de los microorganismos y las reacciones bioquímicas de las fases de la digestión anaerobia, se empleó bolsas de propileno para el almacenamiento de biogás, en un tiempo de 78 días y a condiciones ambientales.

Transcurrido el tiempo de digestión de la materia orgánica se logró determinar el contenido de los compuestos de biogás, de las 10 experimentaciones a escala laboratorio se obtuvo un mayor rendimiento en la N° 8 con 96,06% CH₄ y 3,57% de CO₂ en un volumen de 675 mL, con un tiempo de digestión de 78 días, mientras que en el biodigestor a escala semipiloto se obtuvo 1,53% CH₄ y 98,17% de CO₂ en un volumen de 1875 mL, con un tiempo de digestión de 48 días.

Esta investigación sugiere la implementación del bagazo de caña de azúcar y residuos sólidos urbanos como materia prima para la producción de biogás, gracias a los resultados evidenciados en la generación de metano.

Palabras Clave: Codigestión, biogás, cromatografía, biomasas, residuos sólidos urbanos (RSU), sedimento.

ABSTRACT

METHANE GAS GENERATION THROUGH THE ANAEROBIAN CODE OF URBAN SOLID WASTE AND BIOMASS OF THE CITY OF MACHALA.

AUTHORS:

Valeria de los Ángeles Feijó Chávez

Diana Carolina Villacreses Sarzoza

The objective of the present investigation was to produce biogas by anaerobic co-digestion of biomass and urban solid waste (sediments), which allowed taking advantage of these organic wastes, transforming them into a renewable energy source such as biogas. The co-digestion process used offers different advantages, such as reducing costs by processing different types of raw materials in the biodigester, recovering energy from different biomasses and better degradation of organic waste, obtaining greater performance in obtaining biogas. The raw material used was sugarcane bagasse as biomass, from the artisanal grinding “ Don José ” and the urban solid waste from the “ El Macho ” estuary located in the city of Machala, Ecuador.

The methodology consisted of developing different experiments to evaluate the biogas performance in each of the selected biomasses. The percentage of CH₄ and CO₂ was determined by gas chromatography, which allows the separation and quantification of different compounds present in a mixture by means of adsorption, from which the following results were obtained: potato peel (35.64% CH₄), papaya peel (1.64% CH₄), pineapple peel (0.11% CH₄), pea peel (16.13% CH₄), banana peel (0.39% CH₄), bean peel (0.76% CH₄), sugarcane bagasse (80.85% CH₄), wet sugarcane bagasse (96.06% CH₄), semi-dry sugarcane bagasse (91.39% CH₄), and potato peel with sugarcane bagasse (58.74% CH₄). After the methane quantification in the different co-managements, the sugarcane bagasse presented better results with a 15% increase in the generation of methane when pretreating it, which consisted of moistening the crushed sugarcane for 24 hours, which makes it an effective carbon source for biogas production due to its high content of cellulose (25 - 45%) and hemicelluloses (25 - 50%). Subsequently, we

worked with anaerobic biodigesters that were suitable in 500 mL containers for laboratory-scale experimentations and a PVC container with a capacity of 20 Lt for experimentation on a semi-pilot scale under equal conditions, with a 75% feed (sediment, bagasse from sugarcane and water 0.75: 1.5: 1.5) leaving 25% free for the aeration of the microorganisms and the biochemical reactions of the anaerobic digestion phases, propylene bags were used for the storage of biogas , in a time of 78 days and in environmental conditions.

After the digestion time of the organic matter, the content of the biogas compounds was determined, from the 10 experiments on a laboratory scale a higher yield was obtained in No. 8 with 96.06% CH₄ and 3.57% CO₂ in a volume of 675 mL, with a digestion time of 78 days, while in the semi-pilot biodigester 1.53% CH₄ and 98.17% CO₂ were obtained in a volume of 1875 mL, with a digestion time of 48 days.

This research suggests the implementation of sugarcane bagasse and urban solid waste as raw material for the production of biogas, thanks to the results evidenced in the generation of methane.

Keywords: *Codigestion, biogas, chromatography, biomass, urban solid waste (MSW), sediment.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE ANEXOS	XIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
HIPÓTESIS	4
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	5
1.1. MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS	5
1.2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS – SEDIMENTO	5
1.3. ENERGÍAS RENOVABLES.....	5
1.4. BIOMASA	5
1.5. TIPOS DE BIOMASA	6
1.5.1. Bagazo de caña de azúcar	6

1.5.2.	Características físico químicas del bagazo de caña de azúcar	6
1.5.3.	Principales componentes del bagazo de caña de azúcar	7
1.5.3.1.	<i>Lignina (15 – 25 %)</i>	7
1.5.3.2.	<i>Celulosa (25 – 45%)</i>	8
1.5.3.3.	<i>Hemicelulosas (25 – 50%)</i>	8
1.6.	BIOGÁS	8
1.6.1.	Compuestos y características del biogás.....	8
1.6.2.	Aplicaciones del biogás	9
1.6.3.	Potencial energético del biogás.....	10
1.6.4.	Ventajas de biogás	11
1.6.5.	Desventajas de biogás	11
1.7.	CODIGESTIÓN	11
1.8.	DIGESTIÓN ANAEROBIA	11
1.9.	ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	12
1.9.1.	Etapa de hidrólisis	12
1.9.2.	Etapa acidogénica.....	12
1.9.3.	Etapa acetogénica	13
1.9.4.	Etapa metanogénica.....	13
1.9.5.	Bacterias que intervienen en las etapas de la digestión anaerobia	13
1.10.	BIODIGESTORES.....	14
1.10.1.	Clasificación de los biodigestores.....	14
1.10.1.1.	<i>Sistemas Continuos de una Etapa</i>	14
1.10.1.2.	<i>Sistemas Continuos de dos Etapas:</i>	15
1.10.1.3.	<i>Discontinuos o tipo batch:</i>	15
1.10.2.	Parámetros operacionales del biodigestor.....	15
1.10.2.1.	<i>Temperatura</i>	15

1.10.2.2.	<i>Tiempo de retención hidráulica</i>	15
1.10.2.3.	<i>Relación de Carbono/Nitrógeno</i>	16
1.11.	CROMATOGRAFÍA DE GASES	16
1.11.1.	Instrumentación básica del cromatógrafo de gases:.....	16
1.11.2.	Campos de aplicación de la cromatografía de gases: ⁴⁹	16
1.11.3.	Ventajas de la cromatografía de gases:.....	17
1.11.4.	Desventajas de la cromatografía de gases:	17
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA		18
2.1.	MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1.1.	Materiales	18
2.1.2.	Materia prima	19
2.1.3.	Equipos	19
2.2.	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
2.3.	RECOLECCIÓN Y OBTENCIÓN DE LAS BIOMASAS Y RSU.....	19
2.4.	ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN DE BIOMASA Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	
	20	
2.4.1.	Características del biodigestor.....	20
2.4.2.	Preparación de las diferentes biomasas	21
2.4.3.	Proporciones y adecuación de los biodigestores	22
2.4.4.	Determinación de gas metano mediante cromatografía	22
2.5.	DISEÑO EXPERIMENTAL	22
2.5.1.	Diseño experimental realizado de las codigestiones anaerobias para la obtención de biogás	22
2.6.	VARIABLES	27
2.6.1.	Variables dependientes	27
2.6.2.	Variables independientes	27

2.6.3. Operacionalización de las variables.....	27
CAPÍTULO III: RESULTADOS	29
3.1. EVALUACIÓN DE LAS DIFERENTES BIOMASAS POR MEDIO DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA A ESCALA LABORATORIO.....	29
3.2. PRETRATAMIENTO DE LAS BIOMASAS CON MAYOR PORCENTAJE DE METANO A ESCALA LABORATORIO	30
3.3. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CH ₄ A ESCALA SEMPILOTO	31
3.4. RENDIMIENTO DEL CH ₄ Y CO ₂ DE LAS CODIGESTIONES CON MAYORES RESULTADOS	31
3.5. DETERMINACIÓN DEL CH ₄ Y CO ₂ MEDIANTE CROMATOGRAFÍA GASEOSA.....	34
3.6. GENERACIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR, SEDIMENTO Y AGUA.	38
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES.....	44
CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXOS	52

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Aplicaciones del biogás.....	10
Figura 2. Diseño del biodigestor a escala laboratorio.....	20
Figura 3. Diseño del biodigestor a escala semipiloto.	21
Figura 4. Cromatograma con mayor rendimiento de CH ₄ y CO ₂ de la Exp. N° 7.....	34
Figura 5. Cromatograma con mayor rendimiento de CH ₄ y CO ₂ de la Exp. N° 8.....	35
Figura 6. Cromatograma con mayor rendimiento de CH ₄ y CO ₂ de la Exp. N° 9.....	36
Figura 7. Cromatograma con mayor rendimiento de CH ₄ y CO ₂ de la Exp. N° 10.....	36
Figura 8. Cromatograma con mayor rendimiento de CH ₄ y CO ₂ de la Exp. semipiloto.	37
Figura 9. Porcentaje y volumen de biogás obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua en la experimentación N° 7.....	38
Figura 10. Porcentaje y volumen de biogás por triplicado obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua en la experimentación N° 7.....	39
Figura 11. Porcentaje y volumen de biogás obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar húmedo, sedimento y agua en la experimentación N° 8.	39
Figura 12. Porcentaje y volumen de biogás por triplicado obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar húmedo, sedimento y agua en la experimentación N° 8.....	40
Figura 13. Porcentaje y volumen de biogás obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar semiseco, sedimento y agua en la experimentación N° 9.	41
Figura 14. Porcentaje y volumen de biogás por triplicado obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar semiseco, sedimento y agua en la experimentación N° 9.....	41
Figura 15. Porcentaje y volumen de biogás obtenido a partir de cáscara de papa, bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua en la experimentación N° 10.....	42
Figura 16. Porcentaje y volumen de biogás por triplicado obtenido a partir de cáscara de papa, bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua en la experimentación N° 10.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de biomasa	6
Tabla 2. Características fisicoquímicas del bagazo de caña de azúcar.	7
Tabla 3. Compuestos del biogás	8
Tabla 4. Características del biogás	9
Tabla 5. Diferentes experimentaciones a escala laboratorio y su contenido.	23
Tabla 6. Experimentación a escala laboratorio N° 1	23
Tabla 7. Experimentación a escala laboratorio N° 2.....	24
Tabla 8. Experimentación a escala laboratorio N° 3.....	24
Tabla 9. Experimentación a escala laboratorio N° 4.....	24
Tabla 10. Experimentación a escala laboratorio N° 5.....	24
Tabla 11. Experimentación a escala laboratorio N° 6.....	25
Tabla 12. Experimentación a escala laboratorio N° 7.....	25
Tabla 13. Experimentación a escala laboratorio N° 8.....	25
Tabla 14. Experimentación a escala laboratorio N° 9.....	26
Tabla 15. Experimentación a escala laboratorio N° 10.....	26
Tabla 16. Experimentación a escala semipiloto N° 1	26
Tabla 17. Operacionalización de las variables.....	28
Tabla 18. Resultados de mayor rendimiento de CH ₄ y CO ₂ de las experimentaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 realizadas en el mes de septiembre del 2019.	29
Tabla 18. Resultados de mayor rendimiento de CH ₄ y CO ₂ de las experimentaciones 8, 9 y 10 realizadas en el mes de noviembre del 2019. (Continuación)	30
Tabla 19. Pretratamiento con diferentes condiciones al bagazo de caña de azúcar.....	30
Tabla 20. Rendimiento de CH ₄ a escala semipiloto.....	31
Tabla 21. Rendimiento de las codigestiones por triplicado de CH ₄ y CO ₂	32
Tabla 22. Resultados de CH ₄ y CO ₂ de la experimentación a escala semipiloto.....	34

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Recolección y pretratamiento de la materia prima.....	52
Anexo 2. Adecuación y llenado de biodigestores	54

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Recolección de la biomasa (bagazo de caña de azúcar)	52
Ilustración 2. Recolección de los RSU (sedimento)	52
Ilustración 3. Remojo y cortado de la biomasa.....	53
Ilustración 4. Pesado de RSU y biomasa	53
Ilustración 5. Llenado de los biodigestores a escala laboratorio	54
Ilustración 6. Llenado del biodigestor a escala semipiloto	54
Ilustración 7. Adecuación de los biodigestores	55
Ilustración 8. Experimentaciones de los biodigestores a escala laboratorio.....	55
Ilustración 9. Experimentación del biodigestor a escala semipiloto.....	56

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere a la generación de gas metano mediante la codigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos y biomasas de la ciudad de Machala, en concreto esta investigación tiene como finalidad establecer como propuesta una fuente de energía renovable que permita aprovechar los residuos generados en el sector productivo que son los causantes de la contaminación en el ambiente por ello se ha decidido implementar la obtención de biogás.

El uso del biogás promueve una población sostenible, disminuyendo el consumo de hidrocarburos, reduciendo la contaminación y proporcionando energía amigable con el medio ambiente. La tecnología de digestión anaerobia para la obtención de biogás constituye hoy en día la forma más sostenible de utilizar la energía presente en la biomasas y otros desechos, aumentando la recuperación de nutrientes y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero¹.

La digestión anaerobia se puede definir como un proceso biológico desarrollado en condiciones de ausencia estricta de oxígeno en donde existe descomposición de materia orgánica como carbohidratos, lípidos y grasas² mediante microorganismos e involucra una serie de reacciones metabólicas como la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis³.

Por ello esta investigación se plantea en generar biogás con el objetivo de producir una fuente energía renovable a escala laboratorio y semipiloto mediante la implementación de biodigestores anaeróbicos con bajos costos de adecuación en comparación a otras técnicas, en las que tendrá lugar la degradación de la materia orgánica después de una serie de procesos, dando como resultado el biogás⁴.

PROBLEMA

Los residuos sólidos urbanos generados (RSU) por el estero “El Macho” han sido considerados como fuente de contaminación debido que no reciben un tratamiento que permita disminuir este hecho, por ello se busca incrementar el uso de energías renovables como la obtención de biogás, la cual se puede producir empleando materia prima como bagazo de caña de azúcar obtenida del trapiche artesanal “Don José” en la Ciudad de Machala, estas fuentes nos ayudarán a producir gas metano contribuyendo a disminuir la contaminación al medio ambiente y a las personas que habitan cerca de las áreas de estudio.

JUSTIFICACIÓN

En Ecuador se deben implementar estrategias con el fin de reutilizar a los recursos renovables generados en el sector productivo que causan contaminación al medio ambiente y realizarles un tratamiento que nos permita proporcionarle un valor agregado.

Una alternativa factible será obtener biogás mediante codigestión anaerobia empleando biodigestores a escala laboratorio y semipiloto mediante la degradación de materia prima como biomásas “bagazo de caña de azúcar” y residuos sólidos urbanos “sedimento del Estero el Macho” dando como resultado una mezcla de gases como el metano, dióxido de carbono entre otros, a un bajo costo de producción que beneficiara al sector rural como fuente de energía renovable, mitigando la contaminación y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la codigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos y biomasa producidos en la ciudad de Machala para la obtención de gas metano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar estudios de codigestión con diferentes biomásas y verificar con cual se obtendrá una mayor producción de biogás.
- Adaptar los biodigestores a escala laboratorio – semipiloto y determinar sus condiciones óptimas para un rendimiento adecuado de biogás.
- Determinar el volumen y el porcentaje de los principales componentes del biogás (CH₄ y CO₂) producido mediante análisis de laboratorio en las diferentes codigestiones.
- Producir biogás como fuente de energía renovable a escala laboratorio y semipiloto para disminuir los desechos sólidos urbanos.

HIPÓTESIS

El estudio de diferentes codigestiones empleando biodigestores a escala de laboratorio y semipiloto, permitirá la producción de gas metano para ser utilizado como fuente de energía renovable.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS

Acción de sintetizar la mayor cantidad posible de volumen y peligrosidad de los residuos⁵, empleando una serie de procedimientos o estrategias para mejorar y optimizar los procesos productivos ayudando a prevenir daños en el medio ambiente⁶.

1.2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS – SEDIMENTO

Los RSU o sedimento son partículas de tierra o arcilla insolubles que se localizan en el fondo del agua, acumuladas por producto del propio suelo o también por el proceso de descomposición que sufren las plantas o material orgánico dando como resultado un alto nivel de contaminación⁷.

1.3. ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son producto del aprovechamiento de diversos recursos naturales que se estima son inagotables para poder satisfacer los servicios energéticos en zonas no interconectadas como zonas rurales, esta nueva estrategia se presenta debido a la progresiva demanda de servicios energéticos modernos en países en desarrollo y mercados emergentes⁸.

La (AIE) Agencia Internacional de Energía pronostica que la utilización de energía renovable se extenderá en un promedio de 2.6% entre los próximos 20 años, mientras que la generación mundial de electricidad neta ascenderá sólo 1.9% en el mismo período⁹, debido que al ser consideradas inagotables existe un gran interés en incorporar energías renovables en nuevo proyectos que busquen preservar el medio ambiente y disminuir contaminantes producidos por los combustibles fósiles¹⁰.

1.4. BIOMASA

La biomasa puede definirse como energía producida a partir de fuentes no convencionales de energía renovable, estas pueden ser las que se originan de un proceso biológico (materia orgánica), fotosíntesis (materia vegetal) y de los organismos heterótrofos en los procesos metabólicos que no hayan permanecido en contacto con trazas de elementos con cierto porcentaje de peligrosidad¹¹.

1.5. TIPOS DE BIOMASA

El tipo de biomasa puede variar según su origen y el tipo de residuo, estos pueden clasificarse en biomasa natural, biomasa residual y cultivos energéticos como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 1. Tipos de biomasa

TIPO DE BIOMASA		ORIGEN	FUENTE
Biomasa Animal	Biomasa Residual	Agua residual, residuos ganaderos	Lodos, estiércol bovino, vacuno, etc.
	Biomasa Natural	Están presentes en los ecosistemas naturales	Leña en los bosques, hojas, frutas, ramas.
Biomasa Vegetal	Biomasa Residual	Industrias forestales Agrícolas	Recortes de madera, cortezas, aserrín. Girasol, maíz, soja, cebada, caña de azúcar.
	Cultivos Energéticos	Plantaciones generadas exclusivamente para su transformación y aprovechamiento energético.	Sorgo, eucalipto

Fuente: Elaboración propia

1.5.1. Bagazo de caña de azúcar

El bagazo es el co-producto sólido generado a partir de la trituración en molinos de la caña de azúcar¹², está formado por paredes de celda debido a fibras lignocelulósicas, con humedad absorbida y condensada, diversos extractos y algunos componentes minerales, estos residuos pueden ser utilizados como fuente energética¹³.

1.5.2. Características físico químicas del bagazo de caña de azúcar

El bagazo de caña de azúcar habitualmente se utiliza como fuente de energía y electricidad como resultado de la implementación de procesos químicos para obtener más de un producto de valor comercial a partir de biomasa vegetal, asimismo está compuesto por vasos fibrosos,

parénquima, células epiteliales, celulosa, hemicelulosas, lignina, entre otros^{14,15}. En la siguiente tabla se muestran sus características:

Tabla 2. Características fisicoquímicas del bagazo de caña de azúcar.

PROPIEDADES FÍSICAS	CARACTERÍSTICAS		
Tallo	Grueso		
	Fibroso		
	3 – 5 metros		
Recubrimiento	Epidermis		
	Corteza		
	Periciclo		
Tejido Básico	Parénquima		
PROPIEDADES QUÍMICAS	ENTERO	FIBRA	MÉDULA
Solubilidad en agua caliente %	2.5	0.9	1.9
Lignina %	20.2	20.8	23,8
Celulosa %	37,1	42,01	43,5
Hemicelulosa %	76.6	77.8	77.7
Pentosas %	26.7	27.9	28.4
Ceniza %	1.67	0.7	2.29

Fuente: Adaptado de^{16,17}.

1.5.3. Principales componentes del bagazo de caña de azúcar

1.5.3.1. *Lignina (15 – 25 %)*

La lignina es un componente estructural de la célula en especies vegetales, también la macromolécula natural más abundante después de la celulosa¹⁸, es considerado un polímero complejo e insoluble que unido a otros compuestos como la hemicelulosa y celulosa constituye la pared celular en una distribución regulada a nivel nano-estructural originando redes de lignina-hidratos de carbono¹⁹.

1.5.3.2. *Celulosa (25 – 45%)*

La celulosa es el compuesto orgánico más abundante en la tierra, forma el 40 – 60% de la pared celular de los árboles y plantas, la celulosa se basa en cadenas lineales de componentes de glucosa con enlaces glicosídicos β -1,4²⁰.

1.5.3.3. *Hemicelulosas (25 – 50%)*

Las hemicelulosas conocidas también como polisacáridos actúan como un pegamento que contiene lignina y celulosa, estos polisacáridos están unidos por enlaces covalentes, formando alrededor del 75% de complejos de lignina-carbohidrato (LCC) en las partes maderosas de las plantas, así como también está presente en las frutas y cáscaras de granos²¹.

1.6. BIOGÁS

El biogás es un biocombustible gaseoso generado por la digestión anaerobia considerada una tecnología que permite la disminución de emisiones de efecto invernadero así como también obtener energía mediante la implementación de sustratos de bajo costo como son los vegetales y frutas²².

1.6.1. Compuestos y características del biogás

El biogás contiene alrededor de 50-80% en volumen de metano (CH_4), 30- 40% de dióxido de carbono (CO_2), trazas de sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2), los porcentajes de estos compuestos varían según el sustrato digerido y la tecnología aplicada²³. En la siguiente tabla se detallan estos porcentajes:

Tabla 3. Compuestos del biogás

COMPUESTO	%
Metano (CH_4)	50-80
Dióxido de carbono (CO_2)	30-50
Agua (H_2O)	Saturado
Monóxido de carbono (CO)	0,1
Nitrógeno (N)	0 – 5

Tabla 3. (Continuación)

Hidrógeno (H ₂)	0 – 2
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0 – 500 ppm
Oxígeno (O ₂)	0,1 – 1,0

Fuente: Adaptado de^{24,25}.

El biogás es una forma económica y ecológica para producir energía²⁶, debido a la implementación de materias orgánicas que favorecen su producción, así mismo presenta contenido energético, equivalente energético, temperatura entre otras características que se presentan a continuación:

Tabla 4. Características del biogás

CARACTERISTICAS	%
Contenido energético	6,0 – 6,5 kWh/m ³
Equivalente de combustible	0,60 – 0,65 petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82,5 °C
Densidad normal	1,2 kg m ³
Olor	Huevo podrido
Masa molar	16,043 kg/mol

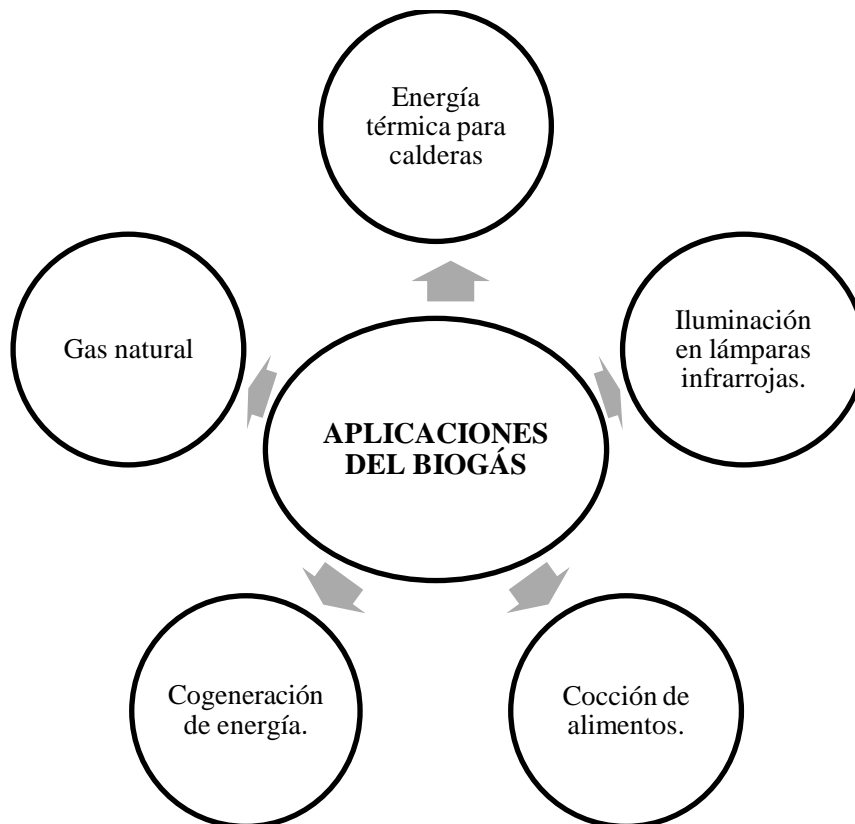
Fuente: Tomado de²⁷.

1.6.2. Aplicaciones del biogás

Una de las aplicaciones que el biogás brinda es la obtención de energía térmica (calor), esta puede ser empleada en lugares donde los combustibles son escasos, abasteciendo de energía calorífica a actividades simples como cocinar y calentar agua²⁸.

Según la cantidad de gas producido dependerá su uso, cuando se genera un volumen medio la mejor opción para su aprovechamiento es la cogeneración para la producción de energía eléctrica y energía térmica por su elevado valor calórico de 19,6 a 25 MJ/m³²⁹.

Figura 1. Aplicaciones del biogás.



Fuente: Elaboración propia

1.6.3. Potencial energético del biogás

El biogás es un gas combustible resultado de la descomposición de materia orgánica que debido a su alto nivel de metano y (5.750 kcal / m³) de capacidad calorífica, lo convierte en combustible ideal para su aprovechamiento energético. De manera próxima, se puede probar que el gas natural posee un contenido en metano del 100%. Debido a ello, se podría señalar que 1m³ de biogás corresponde a la energía de 0,65m³ de gas natural (si el biogás posee una riqueza media en CH₄ del 65%), así mismo para producir 10 kWh de energía total se necesita 1m³ de gas metano aproximadamente²⁴.

1.6.4. Ventajas de biogás

- Fuente de energía renovable.
- Reducción de residuos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios.
- Mitigar la contaminación del suelo por lixiviación de nitratos.
- Eliminación de emanaciones de malos olores por descomposición de residuos sólidos urbanos.
- No se emplea energía para el proceso de digestión anaerobia.
- Disminución de los gases de efecto invernadero.
- No se emplean combustibles fósiles para el proceso de digestión anaerobia.
- Emisiones mínimas de olor, debido a que en la combustión se descompone oxidativamente hasta el 99% de los compuestos volátiles.
- Fácil acceso de materia prima y a bajos costos.

1.6.5. Desventajas de biogás

- En lugares donde las temperaturas son bajas la obtención de biogás no llega a completarse.
- Malos olores, estos pueden estar presentes si existen fugas en el lugar donde se está generando el biogás.

1.7. CODIGESTIÓN

La codigestión anaerobia está definida por la mezcla, digestión y tratamiento de dos o más desechos orgánicos³⁰, las ventajas que se pueden obtener de este proceso son: la recuperación de energía de diferentes biomásas produciendo mayor cantidad de metano, utilizar de forma más eficiente el equipo lo que permite disminuir los costos al procesar diferentes materias primas en un mismo proceso³¹, en el biodigestor se puede obtener un mejor equilibrio de nutrientes, y una mayor degradación de los desechos orgánicos, lo que permite disminuir la acumulación de estos desechos en los vertederos³².

1.8. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico de la degradación de la materia prima en ausencia estricta de oxígeno, obteniendo como componentes principales el metano (50 – 80 %), dióxido de carbono (30 – 50 %)¹ y trazas de otros componentes como (hidrógeno, sulfuro

de hidrógeno, etc.) esta mezcla de compuestos gaseosos es conocida como biogás, el cual puede emplearse como combustible de vehículos, para la producción de calor y generación de electricidad³³, lo que ha permitido que la digestión anaerobia se convierta en una alternativa interesante de energía renovable obteniendo ventajas medioambientales a un bajo costo de producción³⁴. El número y tipo de microorganismos presentes en el proceso de digestión anaerobia dependen del tipo de reactor, sus condiciones óptimas de funcionamiento y de la composición de la materia orgánica.

1.9. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

En el proceso de digestión anaerobia interviene un número de reacciones bioquímicas que se clasifican en cuatro etapas, la hidrólisis, la acidogénica, la acetogénica y la metanogénica interviniendo diferentes microorganismos en cada una de ellas³⁵.

1.9.1. Etapa de hidrólisis

Este es el primer paso para la degradación de la materia orgánica compleja, en donde los carbohidratos, proteínas y grasas se hidrolizan mediante reacciones de óxido – reducción por enzimas extracelulares producidos por bacterias hidrolíticas²⁹ como *Streptococcus* y *Enterobacterium*, transformándose en compuestos solubles simples que pueden ser absorbidos a través de la pared celular y fermentados por microorganismos acidogénicos, dando como resultado, ácidos grasos de cadena corta, dióxido de carbono e hidrógeno³⁶.

Esta etapa se considera limitante para la velocidad del proceso de la digestión anaerobia, porque depende de muchos elementos como, temperatura, pH, tamaño de partículas, composición del sustrato y la producción de enzimas³⁷.

1.9.2. Etapa acidogénica

Es la más rápida en comparación con las otras etapas de la digestión anaerobia, conocida como la fase de acidificación, durante este proceso los compuestos orgánicos hidrolizados se transforman en ácidos grasos volátiles como ácido fórmico, acético, compuestos orgánicos más reducidos como ácido propiónico, butírico, valérico, láctico y alcoholes como metanol, hidrógeno, dióxido de carbono y etanol principalmente, los ácidos grasos producidos actúan como sustrato principal para la siguiente fase³⁸. En esta etapa del proceso de digestión anaerobia se da un olor desagradable característico debido a la producción de amoníaco y sulfuro de hidrógeno.

1.9.3. Etapa acetogénica

Durante este proceso, los ácidos grasos volátiles y los otros compuestos formadores se convierten en acetatos e hidrógeno, los acetatos son utilizados como sustrato directamente para la producción de metano por las bacterias metanogénicas. Esta fase se considera importante para la eficiencia en la obtención del biogás, debido a que se forma el 25% de acetatos, se produce aproximadamente el 11% de hidrógeno y el 70% de metano es producido mediante proceso de reducción de acetatos³⁹.

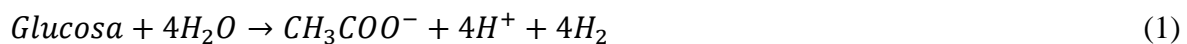
1.9.4. Etapa metanogénica

La etapa metanogénica es considerada como la más importante en el proceso de digestión anaerobia, en donde intervienen un grupo de bacterias bajo condiciones anaeróbicas estrictas sobre los productos obtenidos de las etapas anteriores y los microorganismos metanogénicos están encargados de la creación del gas metano. El acetato, hidrógeno y dióxido de carbono son transformados en metano por dos tipos de microorganismos diferentes como metanógenos acetotróficos (acetato en 70% de CH₄ total) y metanógenos hidrogenotrófico (H₂ y CO₂ en 30% de CH₄ total)^{38, 40}.

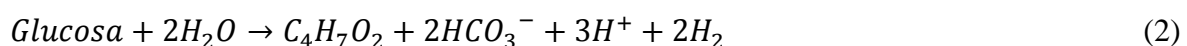
1.9.5. Bacterias que intervienen en las etapas de la digestión anaerobia

Las especies de bacterias, tipo de fermentación y reacciones bioquímicas que interviene en cada una de las etapas de la digestión anaerobia son las que se detallan a continuación⁴¹:

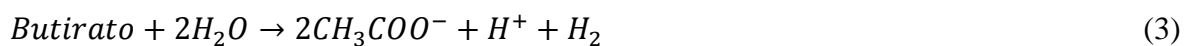
1. Bacterias hidrolíticas acidogénicas → Fermentación de glucosa a acetato



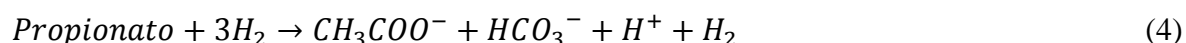
2. Bacterias hidrolíticas acidogénicas → Fermentación de glucosa a butirato



3. Bacterias acetogénicas → Fermentación del butirato a acetato e H₂



4. Bacterias acetogénicas → Fermentación del propionato a acetato



5. Bacterias homoacetogénicas → Acetogénesis a partir del CO₂ y H₂



6. Bacterias metanogénicas hidrogenófilas → Metanogénesis a partir del CO₂ y H₂



7. Bacterias metanogénicas acetoclasticas → Metanogénesis a partir del acetato



1.10. BIODIGESTORES

Un biodigestor consta de un sistema herméticamente cerrado de cualquier forma o tamaño, en el que se deposita una mezcla de materia orgánica (con alto contenido de proteínas, carbohidratos y lípidos) y agua que será fácilmente degradado por microorganismos anaerobios para la producción de biogás y otros productos secundarios como biol⁴².

1.10.1. Clasificación de los biodigestores

Existen diferentes tipos de reactores en la actualidad, el diseño de cada biorreactor está relacionado directamente con la materia prima a degradar y los parámetros que se estudiarán en el proceso⁴³. Se clasifican en tres grupos principales:

1.10.1.1. *Sistemas Continuos de una Etapa*

Todas las reacciones bioquímicas tienen lugar dentro de un solo biodigestor, la carga de alimentación es ininterrumpida, existe una línea de entrada y salida para el proceso, un 95% de las plantas a escala real para la obtención de biogás mediante digestión anaerobia emplea este sistema debido a su diseño y bajo costo económico³⁵.

1.10.1.2. *Sistemas Continuos de dos Etapas:*

Las etapas de la digestión anaerobia se dan en biodigestores separados de la siguiente forma, acidificación y metanogénesis, con tiempos de retención optimizados, permitiendo así una mejor reacción de las bacterias en cada fase⁴³.

1.10.1.3. *Discontinuos o tipo batch:*

Para la obtención de biogás se alimentan los biodigestores con una mezcla de materia orgánica y agua en una sola carga o lote, transcurrido unos días de fermentación se realizan análisis cada cierto tiempo para comprobar el rendimiento del biogás⁴¹, cuando todo el sustrato es consumido por la biomasa presente en el biodigestor se puede decir que el proceso ha finalizado, este tipo de sistema se usa frecuentemente en procesos a escala piloto o cuando se desea realizar nuevas experimentaciones a escala laboratorio⁴⁴.

1.10.2. Parámetros operacionales del biodigestor

1.10.2.1. *Temperatura*

La temperatura tiene un papel importante en los parámetros operacionales del biodigestor, esta influye en el proceso de la digestión anaerobia donde los microorganismos pueden trabajar en tres diferentes rangos: psicrófilos (menos a 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C)⁴⁵.

1.10.2.2. *Tiempo de retención hidráulica*

Se define como la relación que existe entre el volumen del biodigestor y la velocidad de flujo de la carga de alimentación, este parámetro nos permite definir el número de días en que se realizará el proceso, tomando en cuenta el crecimiento de la población microbiana y la bioconversión de los sustratos a biogás, depende fundamentalmente de dos factores, como la biodegradabilidad del sustrato y de las condiciones operacionales del proceso, una de las más importantes la temperatura de reacción⁴⁶. A temperaturas mesófilicas, el tiempo de retención hidráulica se da de 14 a 40 días, a diferencia del rango termofílico que se da de 14 a 20 días, es decir que a mayores temperaturas es más rápida la velocidad del proceso de digestión anaerobia obteniendo un mayor rendimiento de biogás³⁹.

1.10.2.3. Relación de Carbono/Nitrógeno

La relación C/N influye en el proceso de digestión anaerobia debido a el contenido de nutrientes (como calcio, nitrógeno, fósforo, potasio, etc.) que están presentes en un sustrato siendo la principal fuente de energía de las bacterias encargadas de producir metano. Las proporciones óptimas de C/N se encuentran entre 20 – 30 o 20 – 35⁴³.

Los residuos animales presentan alto contenido de nitrógeno con una proporción de C/N menor a 25:1 lo que permite un mayor rendimiento de biogás y una mejor degradación de la materia prima, a diferencia de los residuos agrícolas que presentan una proporción de C/N superior a 30:1 con mayor contenido de carbono obteniendo una producción de biogás más lenta⁴¹.

1.11. CROMATOGRAFÍA DE GASES

La cromatografía de gases es un método de análisis químico, usado principalmente para la detección, separación, y determinación cuantitativa de una mezcla de compuestos orgánicos volátiles⁴⁷, los componentes a separar se distribuyen entre dos fases, la fase estacionaria y la fase móvil, se inyecta la mezcla en la columna y después de la interacción fisicoquímica del relleno de la columna con las sustancias cromatografiadas, las sustancias se separan y se registran en forma de picos, conocidos como cromatogramas⁴⁸.

1.11.1. Instrumentación básica del cromatógrafo de gases:

- Sistema de inyección de la muestra.
- Gas portador, como hidrógeno, helio o nitrógeno.
- Columna capilar o empaquetada, en la que se va a producir la separación de los compuestos.
- Detector

1.11.2. Campos de aplicación de la cromatografía de gases:⁴⁹

- Industrias del gas, petroquímicas, químicas, etc.
- Control de la contaminación ambiental,
- Investigación científica,
- Área de la medicina y productos farmacéuticos,
- Agricultura.

1.11.3. Ventajas de la cromatografía de gases:

- Determinación de análisis en pocos minutos,
- Eficiente, proporcionando altas resoluciones,
- Sensible, detectando muestras en ppm y ppb,
- Análisis cuantitativo de alta precisión
- Confiable y relativamente simple,
- Método de análisis económico.

1.11.4. Desventajas de la cromatografía de gases:

- Limitado a muestras volátiles,
- Difícil para muestras con cambios de temperaturas,
- Difícil para muestras a escala preparativa,
- Requiere de espectroscopia de masas.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.1. Materiales

- Caja de guantes
- Caja de mascarillas
- Bata de laboratorio
- Frascos de vidrio de 500 ml Boeco
- Masilla epóxica Rally
- Caja pegatanke
- Bolsas de propileno
- Equipos de venoclisis
- Etiquetas
- Cuchillos
- Envases de plástico
- Embudo
- Recipiente PVC de 20 Lt.
- Manómetro 100 psi
- Llaves de paso de acero inoxidable de ½ pulg
- Cinta Teflón
- Tubo PVC de ½ pulg
- Manguera de gas azul
- Tubo de llanta
- Vasos de precipitado de 1000 mL
- T de plastigama 1 ½”
- T de plastigama ½”
- Fibra de vidrio
- Abrazaderas
- Unión de 1 ½
- Unión reductora de 1 ½ a ½

— Unión para tubo de rosca macho $\frac{3}{4}$

2.1.2. Materia prima

— Residuos sólidos urbanos (sedimento)

— Cáscara de papa

— Cáscara de papaya

— Cáscara de piña

— Cáscara de arveja

— Cáscara de banano

— Cáscara de haba

— Bagazo de caña de azúcar

— Agua

2.1.3. Equipos

— Balanza analítica Uni Bloc®

— Estufa Memmert UN®

— Cromatógrafo de gas FULI 9790 II

— Computadora Samsung

2.2. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación se realizó en los meses de septiembre 2019 a febrero 2020 en el Laboratorio de Electroquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala.

2.3. RECOLECCIÓN Y OBTENCIÓN DE LAS BIOMASAS Y RSU

Para la obtención de los residuos sólidos urbanos (RSU) (sedimento) se tomó muestras del estero “El Macho” ubicado en sector “San Estuardo” con ayuda de un muestreador de aguas residuales que consta de un tubo de 3 metros de largo de PVC y en uno de sus extremos un recipiente de 300 mL, para obtener las muestras en mejores condiciones y sin restos de basura presente en las orillas del estero (Ver Anexo 1). Estas fueron almacenadas en frascos estériles de 500 mL, teniendo en cuenta que los RSU no deben exceder las 24 horas fuera del estero debido a que puede existir variación en el rendimiento del biogás.

La cáscara de papa se obtuvo del Restaurante “Miller” ubicado en la zona de comedores de la Universidad Técnica de Machala. Las cáscaras de papaya, piña, arveja, banano y haba fueron recolectadas del Mercado Municipal “25 de Junio” ubicado en la calle Pichincha y Napoleón Mera, de la Ciudad de Machala. Mientras que el bagazo de caña de azúcar considerado como residuo agrícola fue recolectado del trapiche artesanal “Don José” ubicado en el sector Urseza 2 al norte de la ciudad de Machala (Ver Anexo 1), considerando que el bagazo debe estar recién molido para conservar sus principales propiedades y así obtener un mejor porcentaje de biogás.

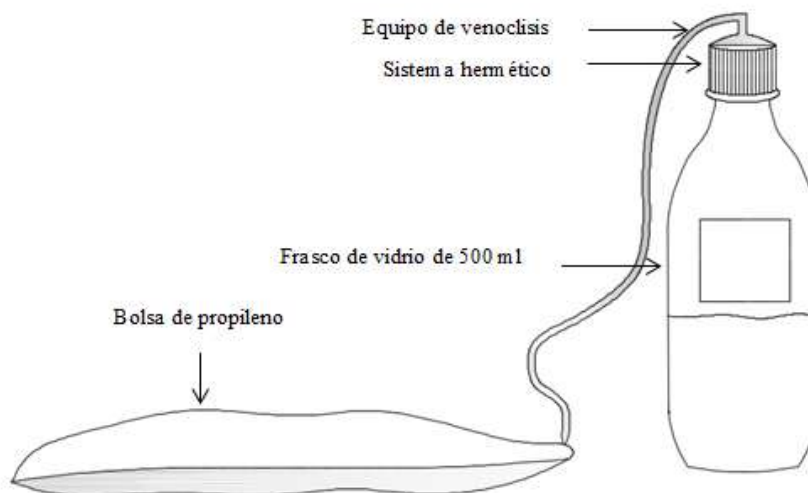
2.4. ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN DE BIOMASA Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

2.4.1. Características del biodigestor

▪ Biodigestor a Escala Laboratorio

Para el acondicionamiento de los biodigestores se utilizaron frascos de vidrio Boeco de 500 mL, se los esterilizó en la estufa por 24 horas a 60°C, se realizó un orificio en la parte superior de la tapa para colocar una manguera de 15 cm de largo de un ¼”, se selló la tapa y la manguera con masilla epóxica Rally, y en el otro extremo de la manguera se conectó la bolsa de propileno para almacenar el biogás.

Figura 2. Diseño del biodigestor a escala laboratorio.

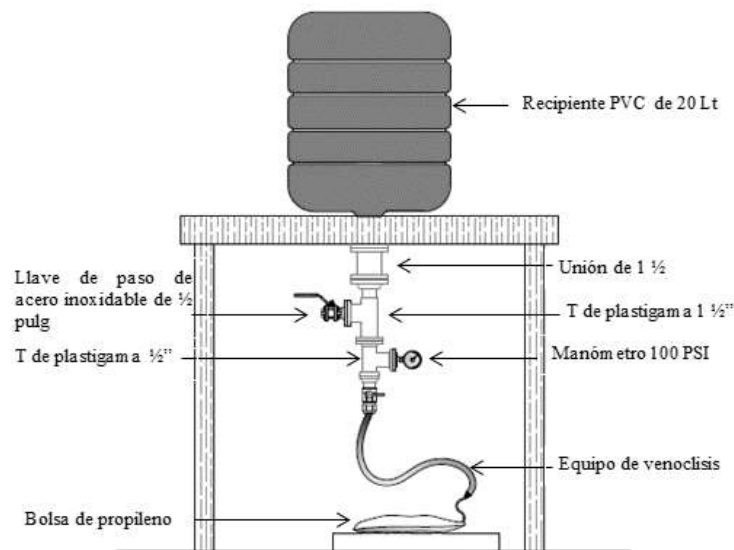


Fuente: Elaboración propia

▪ Biodigestor a Escala Semipiloto

Para el funcionamiento del biodigestor se utilizó un recipiente PVC con 20 L de capacidad, donde se realizaron conexiones en la parte superior con fibra de vidrio, llaves de paso, reductor, T, manómetro, uniones de diferentes pulgadas y 50 cm de largo de un tubo PVC adecuando una salida para el biogás.

Figura 3. Diseño del biodigestor a escala semipiloto.



Fuente: Elaboración propia

2.4.2. Preparación de las diferentes biomásas

Las cáscaras de papa, papaya, piña, arveja, banano y haba fueron sometidas a un pretratamiento que consistió en cortarlas en pequeños pedazos para que exista un mejor acceso al ser introducidas a los biodigestores y obtener una degradación de la biomasa óptima.

El bagazo de caña de azúcar fue sometido a un pretratamiento diferente basado en humedecer por 24 horas la caña de azúcar triturada, transcurrido ese tiempo se separó la corteza del bagazo y se procedió a cortar en pequeños pedazos para obtener un menor tiempo de retención en la digestión de las biomásas (Ver Anexo 1).

2.4.3. Proporciones y adecuación de los biodigestores

Una vez realizado el análisis físico químico para la obtención de biogás mediante codigestión de materia orgánica, se procedió a llenar los biodigestores a escala laboratorio y semipiloto con un contenido total del 75% (sedimento, biomasa y agua 0,75:1,5:1,5) dejando libre el 25% para la aireación de los microorganismos y las reacciones bioquímicas de las fases de la digestión anaerobia (Ver Anexo 2).

2.4.4. Determinación de gas metano mediante cromatografía

Para determinar el contenido de gas metano se utilizó el cromatógrafo de gas FULI 9790 II, con una jeringa de 5mL para gases como sistema de inyección de la muestra, hidrógeno como gas portador, una columna capilar (30m x 0.32mm x 40µm) en la que se va a producir la separación de los compuestos, aire comprimido como disolvente y un detector de ionización de llama (FID)⁵⁰.

El proceso consistió en ajustar el panel del cromatógrafo a las siguientes condiciones 35.0°C columna capilar, 70.0°C inyector 1, 160.0 °C inyector 2, 160.0 detectores, teniendo en cuenta que las válvulas y llaves de los tanques de aire comprimido e hidrógeno estén abiertas respectivamente, una vez nivelado los parámetros, se realizó la prueba de flama en los detectores y se verificó con una luna de reloj si estos estaban encendidos.

Se inició el programa FL9790 colocando el FID y TCD en “Test y Zero” observando que no haya interferencias en la línea de análisis, se inyectó la muestra durante 25 segundos y el gas se analizó mediante desplazamiento por los patrones establecidos en el equipo, cada muestra se analizó en un tiempo de 22 minutos.

2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

2.5.1. Diseño experimental realizado de las codigestiones anaerobias para la obtención de biogás

En el laboratorio de Electroquímica se realizaron las siguientes experimentaciones por triplicado a escala laboratorio, (experimentaciones 1 – 7) en el mes de septiembre y (experimentaciones 8 – 10) en el mes de noviembre, empleando biodigestores de 500 mL, con diferentes proporciones de biomasa, RSU y agua como se los detalla a continuación:

Tabla 5. Diferentes experimentaciones a escala laboratorio y su contenido de biomasas, RSU y agua.

EXPERIMENTACIÓN	CONTENIDO DE BIOMASA Y RSU
<i>Experimentación 1</i>	Cáscara de papa, sedimento y agua.
<i>Experimentación 2</i>	Cáscara de papaya, sedimento y agua.
<i>Experimentación 3</i>	Cáscara de piña, sedimento y agua.
<i>Experimentación 4</i>	Cáscara de arveja, sedimento y agua.
<i>Experimentación 5</i>	Cáscara de banano, sedimento y agua.
<i>Experimentación 6</i>	Cáscara de haba, sedimento y agua.
<i>Experimentación 7</i>	Bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua.
<i>Experimentación 8</i>	Bagazo de caña de azúcar húmedo, sedimento y agua.
<i>Experimentación 9</i>	Bagazo de caña de azúcar semiseco, sedimento y agua.
<i>Experimentación 10</i>	Cáscara de papa, bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua.

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes tablas se detallan las cantidades en base a la siguiente relación, biomasa (150 g), RSU (75 g) y agua (150 mL) empleadas para cada una de las experimentaciones a escala laboratorio desde la tabla 6 hasta la tabla 12 en el mes de septiembre, realizando mediciones por cromatografía una vez por semana, lo que nos ayudó a controlar el comportamiento del biogás durante 78 días.

Tabla 6. Experimentación a escala laboratorio N° 1

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Cáscara de papa	150,13 g
RSU	Sedimento	75,20 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Experimentación a escala laboratorio N° 2

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Cáscara de papaya	150,42 g
RSU	Sedimento	75,14 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Experimentación a escala laboratorio N° 3

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Cáscara de piña	150,15 g
RSU	Sedimento	75,13 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Experimentación a escala laboratorio N° 4

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Cáscara de arveja	150,30 g
RSU	Sedimento	75,26 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Experimentación a escala laboratorio N° 5

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Cáscara de banano	150,07 g
RSU	Sedimento	75,05 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Experimentación a escala laboratorio N° 6

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Cáscara de haba	150,30 g
RSU	Sedimento	75,38 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Experimentación a escala laboratorio N° 7

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Bagazo de caña de azúcar	150,47 g
RSU	Sedimento	75,16 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 13, 14 y 15 se muestran las cantidades en base a la siguiente relación, biomasa (150 g), RSU (75 g) y agua (150 mL) empleadas para las tres experimentaciones a escala laboratorio en el mes de noviembre, realizando mediciones por cromatografía una vez por semana, lo que nos ayudó a controlar el comportamiento del biogás durante 78 días.

Tabla 13. Experimentación a escala laboratorio N° 8

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Bagazo de caña de azúcar húmedo	150,66 g
RSU	Sedimento	75,35 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Experimentación a escala laboratorio N° 9

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Bagazo de caña de azúcar semiseco	150,08 g
RSU	Sedimento	75,23 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Experimentación a escala laboratorio N° 10

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Cáscara de papa	75,43 g
	Bagazo de caña de azúcar	75,37 g
RSU	Sedimento	75,50 g
Sustancia	Agua	150 mL

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 16 se especifica las cantidades de biomasa (5625 g), RSU (3750 g) y agua (5625 mL), empleadas en el biodigestor a escala semipiloto realizando 3 mediciones por cromatografía, lo que nos ayudó a controlar el comportamiento del biogás durante 48 días.

Tabla 16. Experimentación a escala semipiloto N° 1

INDICADOR	MATERIA PRIMA	CANTIDAD
Biomasa	Bagazo de caña de azúcar húmedo	5625 g
RSU	Sedimento	3750 g
Sustancia	Agua	5625 mL

Fuente: Elaboración propia

2.6. VARIABLES

2.6.1. Variables dependientes

- Rendimiento del porcentaje de CH₄ y CO₂ por codigestión anaerobia.

2.6.2. Variables independientes

- Tipos de biomasa
- Relación biomasa/RSU

2.6.3. Operacionalización de las variables

A continuación se indica el proceso de las variables dependientes e independientes en función de sus indicadores:

Tabla 17. Operacionalización de las variables

VARIABLES	INDICADORES	UNIDAD
Dependiente		
	Tiempo de retención:	
Rendimiento del porcentaje de CH ₄ y CO ₂ por codigestión anaerobia.	4 min= CH ₄	%
	10 min= CO ₂	%
Independiente		
— Tipos de biomasa	Cáscara papa, papaya, piña, arveja, banano, haba, bagazo de caña de azúcar.	
— Relación biomasa/RSU		
	Biomasa(150)	g
Biodigestor a escala laboratorio	RSU(75)	g
	Agua(150)	mL
	Biomasa(5000)	g
Biodigestor a escala semipiloto	RSU(3000)	g
	Agua(5000)	mL

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. EVALUACIÓN DE LAS DIFERENTES BIOMASAS POR MEDIO DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA A ESCALA LABORATORIO

En las diferentes experimentaciones detalladas en la Tabla 18 se presentó un tiempo de retención en los biodigestores de 10 a 78 días a temperaturas mesofílicas (entre 25 y 35°C), donde se observó rendimientos mayores en los porcentajes de CH₄ y menores de CO₂, Este resultado se asemeja a los autores⁴¹ basado en el estudio de la relación de temperaturas, mesofílica con un rango óptimo de 25 a 35°C y un tiempo de fermentación de 30 a 60 días y termofílica con un rango óptimo de 50 a 60°C con 10 a 15 días de fermentación, debido a que las bacterias metanogénicas son bastantes sensibles a variaciones de temperaturas, los autores recomiendan trabajar en temperaturas mesofílicas lo que permite obtener un mejor rendimiento de biogás.

Tabla 18. Resultados de mayor rendimiento de CH₄ y CO₂ de las experimentaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 realizadas en el mes de septiembre del 2019.

EXP. N°	CONTENIDO (Biomasa, RSU y agua)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	TIEMPO (Días)	VOLUMEN (mL)
1	Cáscara de papa, sedimento y agua.	35,64	42,22	19	500
2	Cáscara de papaya, sedimento y agua.	1,64	12,35	10	500
3	Cáscara de piña, sedimento y agua.	0,11	98,22	10	400
4	Cáscara de arveja, sedimento y agua.	16,13	24,57	21	500
5	Cáscara de banano, sedimento y agua.	0,39	93,7	19	400
6	Cáscara de haba, sedimento y agua.	0,76	78,53	21	400
7	Bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua.	80,85	17,43	78	625

Tabla 18. Resultados de mayor rendimiento de CH₄ y CO₂ de las experimentaciones 8, 9 y 10 realizadas en el mes de noviembre del 2019. (Continuación)

8	Bagazo de caña de azúcar húmedo, sedimento y agua.	96,06	3,57	78	675
9	Bagazo de caña de azúcar semiseco, sedimento y agua.	91,39	8,17	78	750
10	Cáscara de papa, bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua.	58,74	26,46	78	350

Fuente: Elaboración propia

3.2. PRETRATAMIENTO DE LAS BIOMASAS CON MAYOR PORCENTAJE DE METANO A ESCALA LABORATORIO

Debido a los análisis de cromatografía realizados en los meses de septiembre y octubre se pudo observar un aumento en el porcentaje de metano en las experimentaciones 1 y 7 detallados en la tabla anterior, por lo que se decide implementar el bagazo de caña de azúcar y la cáscara de papa como biomاسas para nuevas experimentaciones a las cuales se les realizará diferentes pretratamientos, como se evidencia en la Tabla 19.

Tabla 19. Pretratamiento con diferentes condiciones al bagazo de caña de azúcar.

EXP. N°	BIOMASA	CONDICIÓN	PRETRATAMIENTO
8	Bagazo de caña de azúcar	Húmedo	Humedecer 24 horas, separar el bagazo de la corteza, cortar y pesar.
9	Bagazo de caña de azúcar	Semiseco	Separar el bagazo de la corteza, llevar a la estufa por 4 horas a 60 °C, cortar y pesar.
10	Bagazo de caña de azúcar y Cáscara de papa	Mixto	Separar el bagazo de la corteza, cortar y pesar. Cortar y pesar la cáscara de papa.

Fuente: Elaboración propia

En las diferentes experimentaciones detalladas en la Tabla 18 se puede evidenciar un incremento en el porcentaje de CH₄, obteniendo los siguientes resultados, N° 8 con 96,06% de CH₄ y 3,57% de CO₂; N° 9 con 91,39% de CH₄ y 8,17% de CO₂; y N° 10 con 58,74% de CH₄ y 26,46% de CO₂. En la experimentación N° 8 se observa un incremento del 4,67 y 37,32% de CH₄ en comparación a las experimentaciones N° 9 y N° 10 respectivamente, por lo que se decide utilizar el bagazo de caña de azúcar húmedo como biomasa en la experimentación escala semipiloto.

3.3. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CH₄ A ESCALA SEMIPILOTO

Se utilizó bagazo de caña de azúcar húmedo, para la carga del biodigestor a escala semipiloto debido al aumento de CH₄ presente en la Tabla 18.

Tabla 20. Rendimiento de CH₄ a escala semipiloto

EXPERIMENTACIÓN A ESCALA SEMIPILOTO					
EXP. N°	CONTENIDO (Biomasa, RSU y agua)	CH₄ (%)	CO₂ (%)	TIEMPO (Días)	VOLUMEN (mL)
1	Bagazo de caña de azúcar húmedo, sedimento y agua.	1,54	98,17	48	1875

Fuente: Elaboración propia

En esta experimentación se obtuvo 1,54% de CH₄ y 98,17% de CO₂ con un tiempo de digestión de 48 días, el volumen del biodigestor a escala semipiloto fue de 20 L en comparación a los biodigestores a escala laboratorio con 500 mL este resultado se determinó debido a que la degradación de la materia orgánica fue más lenta en este proceso.

3.4. RENDIMIENTO DEL CH₄ Y CO₂ DE LAS CODIGESTIONES CON MAYORES RESULTADOS

En la Tabla 21 se observa el rendimiento de CH₄ y CO₂ de las experimentaciones N° 7, 8, 9 y 10 por triplicado, con un contenido de bagazo de caña de azúcar en diferentes condiciones, cáscara de papa, sedimento y agua, en un tiempo de digestión de 6 a 78 días.

Tabla 21. Rendimiento de las codigestiones por triplicado de CH₄ y CO₂.

EXP. N°	REPETICIÓN N°	CH₄ (%)	CO₂ (%)	VOLUMEN (mL)
7	1	23,08	57,99	250
		53,89	33,49	275
		74,03	24,67	525
		80,85	17,43	625
	2	21,34	55,66	200
		56,78	35,67	250
		72,03	22,34	450
		78,56	15,39	600
	3	19,23	53,9	230
		59,8	39,67	305
		69,5	26,8	535
		75,45	12,34	665
8	1	18,89	29,9	100
		80,09	6,44	175
		89,7	8,71	475
		96,06	3,57	675
	2	16,05	28,19	80
		78,1	4,33	145
		85,34	6,78	395
		93,79	2,01	545
	3	17,9	30,12	125
		79,02	5,01	200
		87,46	7,89	450
		95,23	2,2	700

Tabla 41. (Continuación)

9	1	39,47	54,54	200
		47,38	20,2	250
		83,07	15,68	450
		91,39	8,17	750
	2	37,75	52,65	150
		44,46	17,06	225
		79,89	11,59	455
		85,89	8,03	785
	3	29,58	65,01	230
		46,79	23,8	275
		81,45	17,89	480
		89,9	8,69	730
10	1	4,42	19,85	100
		9,03	77,5	175
		14,73	13,5	250
		58,74	26,46	350
	2	3,12	18,65	130
		10,14	78,9	220
		16,98	15,74	295
		55,7	24,56	405
	3	4,01	19,65	100
		11,02	79,21	175
		15,67	14,04	265
		57,04	25,07	385

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 22 se observa el rendimiento de CH₄ y CO₂ de la experimentación a escala semipiloto, con un contenido de bagazo de caña de azúcar húmedo, sedimento y agua, en un tiempo de digestión de 6 a 48 días.

Tabla 52. Resultados de CH₄ y CO₂ de la experimentación a escala semipiloto.

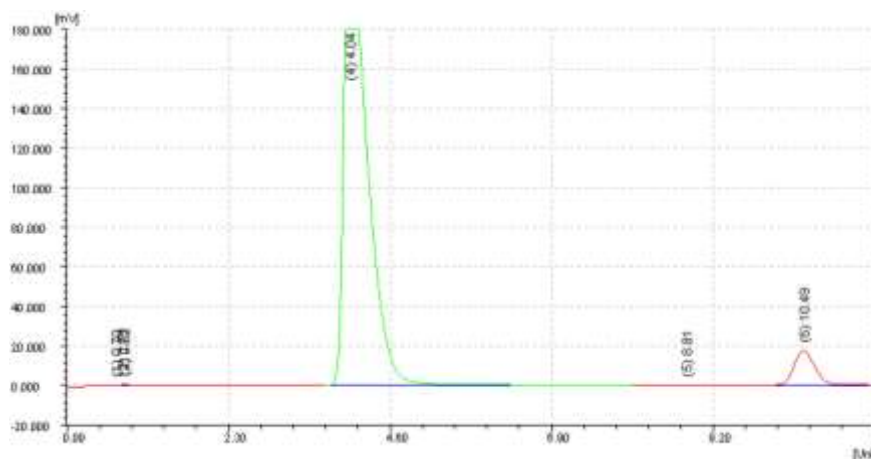
CONTENIDO	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	TIEMPO (Días)	VOLUMEN (mL)
Bagazo de caña de azúcar húmedo, RSU y agua.	0,3	94,65	6	1000
	0,5	93,59	24	1800
	1,54	98,17	48	1875

Fuente: Elaboración propia

3.5. DETERMINACIÓN DEL CH₄ Y CO₂ MEDIANTE CROMATOGRAFÍA GASEOSA

En las figuras 4, 5, 6, 7 y 8 se evidencian los resultados obtenidos por cromatografía gaseosa de las experimentaciones a escala laboratorio 7, 8, 9, 10 y a escala semipiloto respectivamente, donde la biomasa bagazo de caña de azúcar fue sometida a diferentes pretratamientos para obtener un mejor rendimiento en la obtención de biogás.

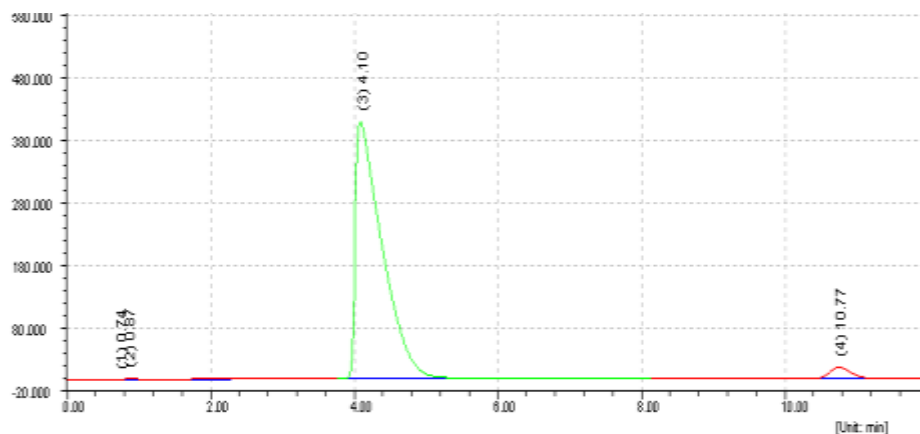
Figura 4. Cromatograma con mayor rendimiento de CH₄ y CO₂ de la experimentación N° 7.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se puede observar el análisis realizado por cromatografía gaseosa a la repetición 1 de la experimentación N° 7 con un contenido de bagazo de caña de azúcar (150,47 g), sedimento (75,16 g) y agua (150 mL). Los resultados obtenidos para CH₄ y CO₂ son los siguientes: tiempo de retención 4,4 – 10,4 (minutos), área de pico de 4,10 – 10,3 (mV*s) y 23,08 – 57,99 (%) de CH₄ y CO₂ respectivamente para la muestra con menor rendimiento. Mientras que para la muestra con mayor rendimiento se obtuvo el siguiente resultado: tiempo de retención 4,4 – 10,5 (minutos), área de pico de 38,7 – 8,34 (mV*s) y 80,85 – 17,43 (%) de CH₄ y CO₂ a los 78 días de digestión.

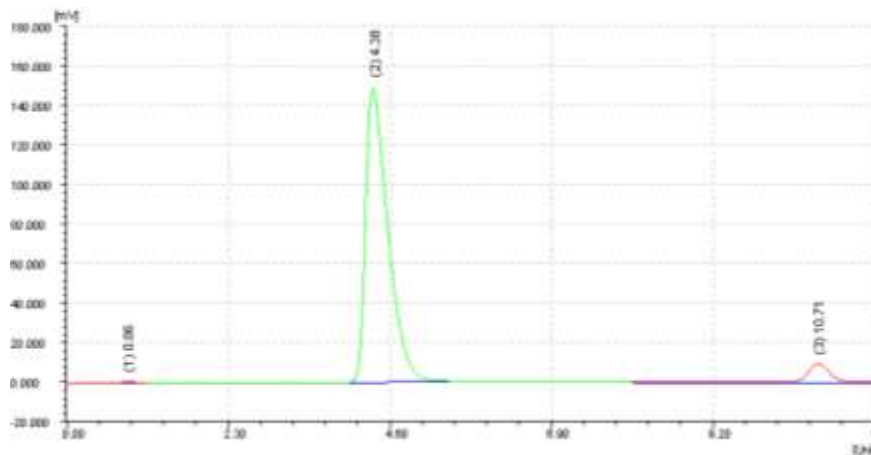
Figura 5. Cromatograma con mayor rendimiento de CH₄ y CO₂ de la experimentación N° 8.



Fuente: Elaboración propia

Así mismo, el análisis realizado por cromatografía gaseosa a la repetición 1 de la experimentación N° 8 con un contenido de bagazo de caña de azúcar húmedo (150,66 g), sedimento (75,35 g) y agua (150 mL) se muestra en la Figura 5. Los resultados obtenidos para CH₄ y CO₂ son los siguientes: tiempo de retención 4,3 – 10,5 (minutos), área de pico de 1,37 – 2,17 (mV*s) y 18,89 – 29,9 (%) de CH₄ y CO₂ respectivamente para la muestra con menor rendimiento. Mientras que para la muestra con mayor rendimiento se obtuvo el siguiente resultado: tiempo de retención 4,10 – 10,8 (minutos), área de pico de 109,4 – 4,06 (mV*s) y 96,06 – 3,57 (%) de CH₄ y CO₂ a los 78 días de digestión.

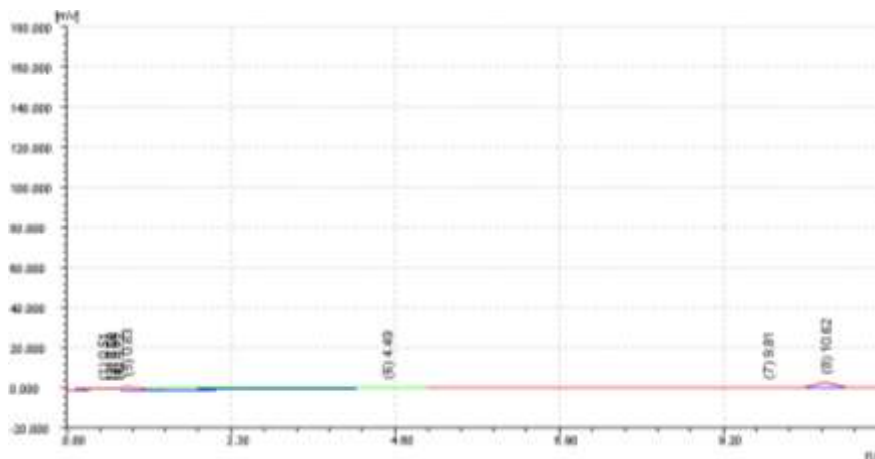
Figura 6. Cromatograma con mayor rendimiento de CH₄ y CO₂ de la experimentación N° 9.



Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en la Figura 6 se puede observar el análisis realizado por cromatografía gaseosa a la repetición 1 de la experimentación N° 9 con un contenido de bagazo de caña de azúcar semiseco (150,08 g), sedimento (75,23 g) y agua (150 mL). Los resultados obtenidos para CH₄ y CO₂ son los siguientes: tiempo de retención 4,2 – 10,3 (minutos), área de pico de 5,47 – 7,55 (mV*s) y 39,47 – 54,54 (%) de CH₄ y CO₂ respectivamente para la muestra con menor rendimiento. Mientras que para la muestra con mayor rendimiento se obtuvo el siguiente resultado: tiempo de retención 4,4 – 10,7 (minutos), área de pico de 33,3 – 2,98 (mV*s) y 91,39 – 8,17 (%) de CH₄ y CO₂ a los 78 días de digestión.

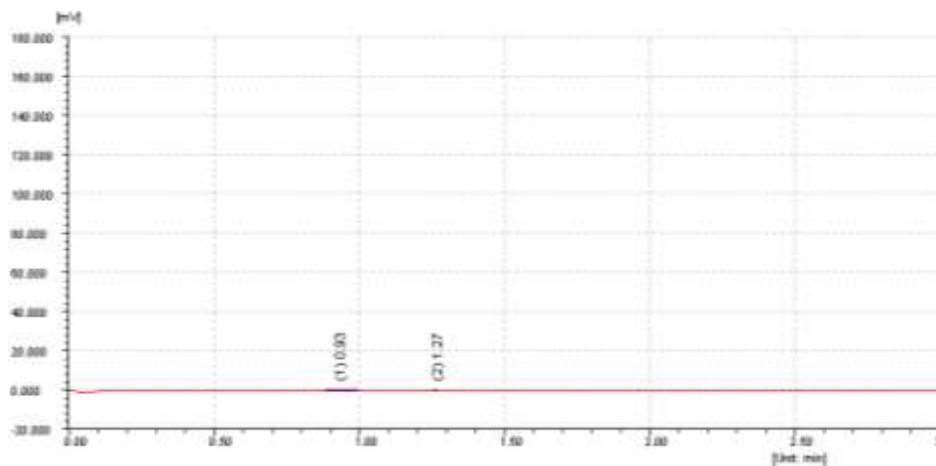
Figura 7. Cromatograma con mayor rendimiento de CH₄ y CO₂ de la experimentación N° 10.



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, el cromatograma de la experimentación N° 10 – repetición 1 con un contenido de cáscara de papa (75,43 g) bagazo de caña de azúcar (75,37 g), sedimento (75,50 g) y agua (150 mL) puede ser observado en la Figura 7. Los resultados obtenidos para CH₄ y CO₂ son los siguientes: tiempo de retención 4,5 – 10,6 (minutos), área de pico de 0,22 – 1,02 (mV*s) y 4,42 – 19,85 (%) de CH₄ y CO₂ respectivamente para la muestra con menor rendimiento. Mientras que para la muestra con mayor rendimiento se obtuvo el siguiente resultado: tiempo de retención 4,5 – 10,6 (minutos), área de pico de 14,38 – 6,48 (mV*s) y 58,74 – 26,46 (%) de CH₄ y CO₂ a los 78 días de digestión.

Figura 8. Cromatograma con mayor rendimiento de CH₄ y CO₂ de la experimentación semipiloto.



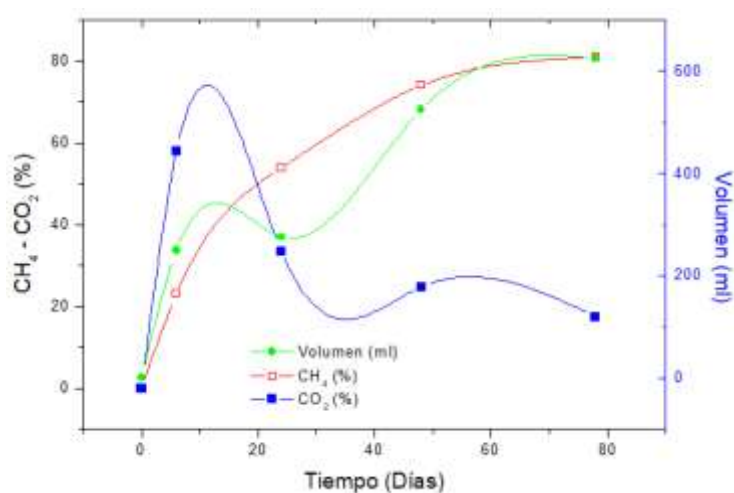
Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 8 se puede observar el análisis realizado por cromatografía gaseosa a la experimentación a escala semipiloto con un contenido de bagazo de caña de azúcar húmedo (5625 g), sedimento (3750 g) y agua (5625 mL). Los resultados obtenidos para CH₄ y CO₂ son los siguientes: tiempo de retención 4,3 – 9,92 (minutos), área de pico de 0,13 – 41,9 (mV*s) y 0,3 – 94,65 (%) de CH₄ y CO₂ respectivamente para la muestra con menor rendimiento. Mientras que para la muestra con mayor rendimiento se obtuvo el siguiente resultado: tiempo de retención 4,5 – 9,97 (minutos), área de pico de 1,83 – 117,4 (mV*s) y 1,54 – 98,17 (%) de CH₄ y CO₂ a los 48 días de digestión.

3.6. GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR, SEDIMENTO Y AGUA.

A continuación las Figuras 9, 11, 13, y 15 presentan los porcentajes de CH_4 , CO_2 y volumen de biogás obtenido durante un tiempo de digestión de 78 días para las experimentaciones a escala laboratorio N° 7, 8, 9 y 10 que se realizaron desde el mes de septiembre del 2019 hasta febrero del 2020.

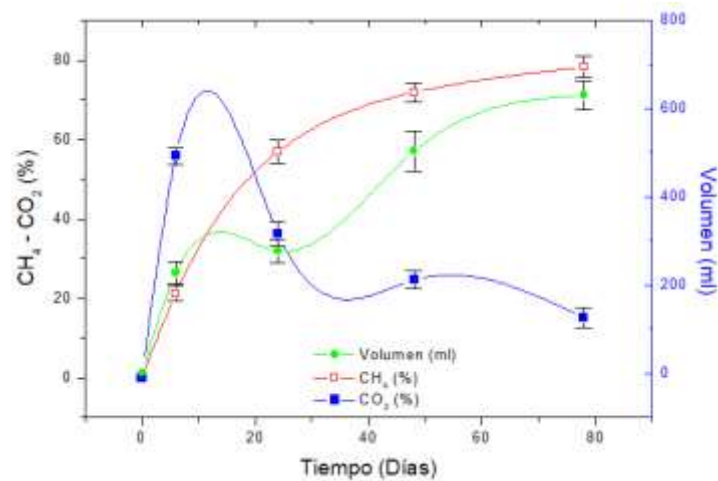
Figura 9. Porcentaje y volumen de biogás obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua en la experimentación N° 7.



Fuente: Elaboración propia

En este sentido, en la Figura 9 se resume los resultados obtenidos en un tiempo de 78 días de fermentación metanogénica de la experimentación N° 7 donde se obtuvieron alrededor de 775 mL de biogás con 85% de metano. Investigaciones similares sobre producción de metano a partir de residuos ricos en carbohidratos favorecen la producción de metano, debido al alto grado de descomposición⁵¹. La hidrólisis enzimática del bagazo de caña es la primera etapa de la producción de biogás, empieza desde el momento que se inocula el sedimento el cual contiene anaerobios estrictos y bacterias facultativas las cuales son las responsables de este proceso, esta hidrólisis se evidencia con la producción de CO_2 , el compuesto indica que se están descarboxilando los carbohidratos de cadena larga a sus monómeros de cadena corta (monosacáridos).

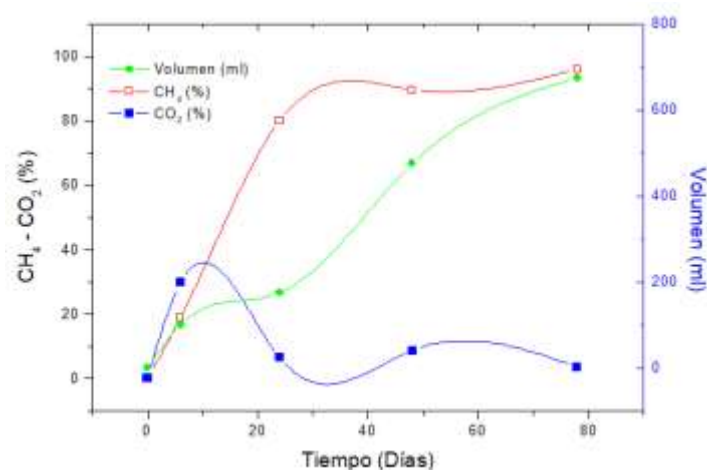
Figura 10. Porcentaje y volumen de biogás por triplicado obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua en la experimentación N° 7.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 10 se compararon los porcentajes de CH₄, CO₂ y volumen en el tiempo de retención establecido, mediante desviación estándar determinándose que no existen diferencias significativas en sus periodos de tiempo, es decir que, a los 6 días el CH₄ fue de 23,08% y 57,99% de CO₂, mientras que el tiempo transcurría y el volumen aumentaba hasta llegar al día 78 el % de CO₂ disminuye hasta un 12,34% mientras que el CH₄ incrementa hasta el 80,85%.

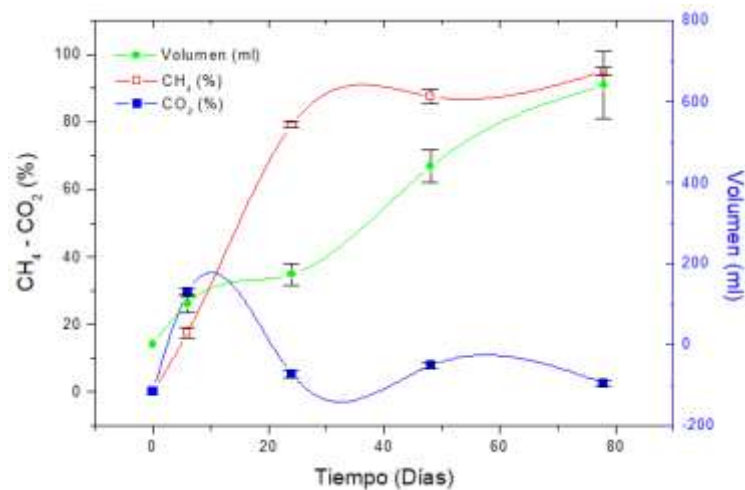
Figura 11. Porcentaje y volumen de biogás obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar húmedo, sedimento y agua en la experimentación N° 8.



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la Figura 11 muestra la tendencia de la relación entre CH_4 , y CO_2 presente en la experimentación N° 8 y el tiempo de retención de 78 días de fermentación metanogénica obteniéndose alrededor de 675 mL de biogás con 96,06% de metano. En otros estudios en los que la biomasa fue codigerida con sustratos de alto contenido de carbono se observaron mejoras en el proceso de producción de biogás.

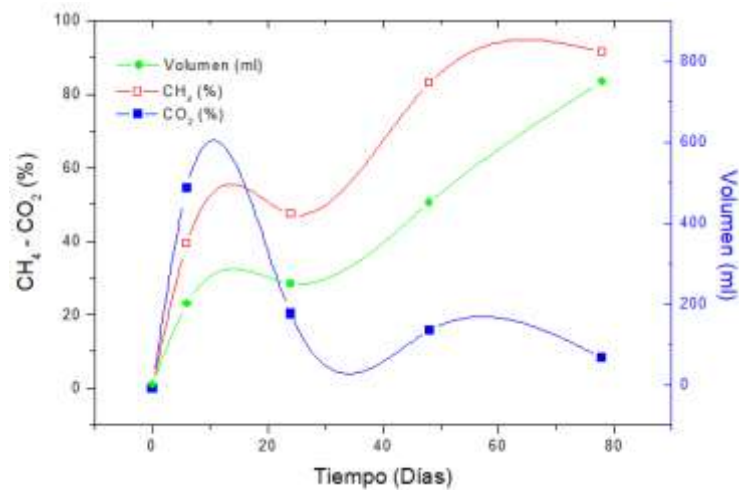
Figura 12. Porcentaje y volumen de biogás por triplicado obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar húmedo, sedimento y agua en la experimentación N° 8.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12, se compararon los porcentajes de CH_4 , CO_2 y volumen en el tiempo de retención establecido, mediante desviación estándar determinándose que existen diferencias significativas en el periodo de 6 días en relación al porcentaje de CH_4 con un valor de 18,89% y 29,9% de CO_2 en un volumen de 100 mL, sin embargo desde los 24 a 78 días el CO_2 disminuye hasta un 3,57 % mientras que el CH_4 incrementa hasta el 96,06 % lo que indica que no existe diferencias significativas en este periodo, debido a que los valores obtenidos en el triplicado son similares.

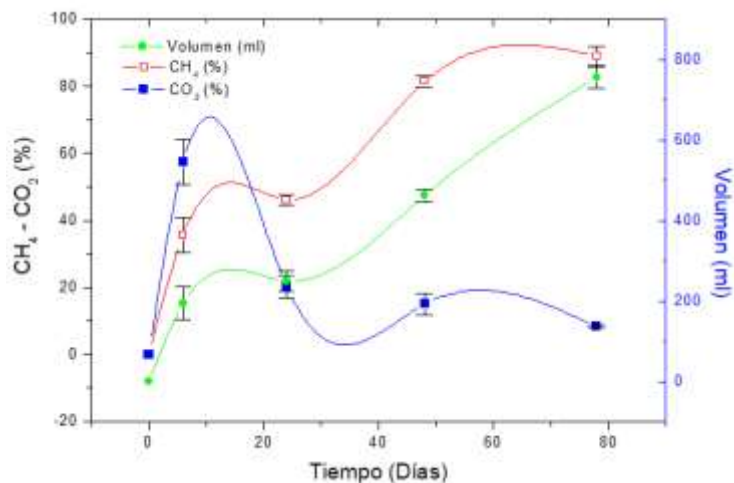
Figura 13. Porcentaje y volumen de biogás obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar semiseco, sedimento y agua en la experimentación N° 9.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la experimentación N° 9 son presentados en la Figura 13, con una concentración máxima de 91,39% de metano y un volumen total de 750 mL, después de 78 días de digestión el porcentaje de CO₂ disminuye de 54,54% a 8,17 %.

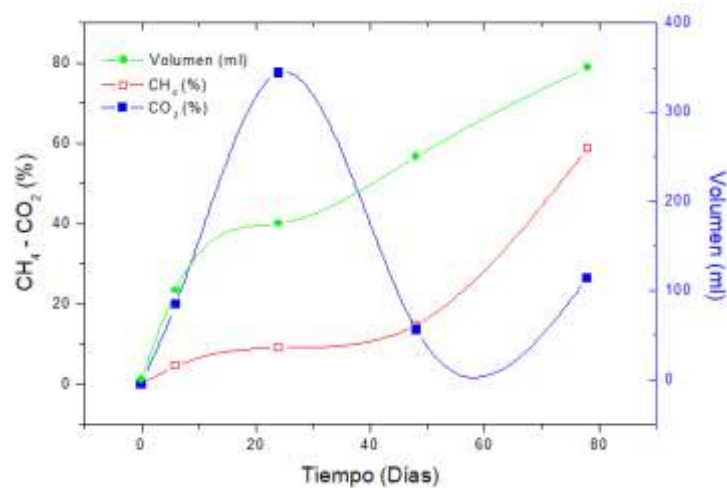
Figura 14. Porcentaje y volumen de biogás por triplicado obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar semiseco, sedimento y agua en la experimentación N° 9.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 se compararon los porcentajes de CH₄, CO₂ y volumen en el tiempo de retención establecido, mediante desviación estándar determinándose que no existe diferencias significativas en sus periodos de tiempo, es decir que, a los 6 días el CH₄ fue de 39,74% y CO₂ fue de 54,54%, mientras que el tiempo transcurría y el volumen aumentaba hasta llegar al día 78 el CH₄ aumento al 91,39% y el CO₂ disminuyo significativamente a 8,17%.

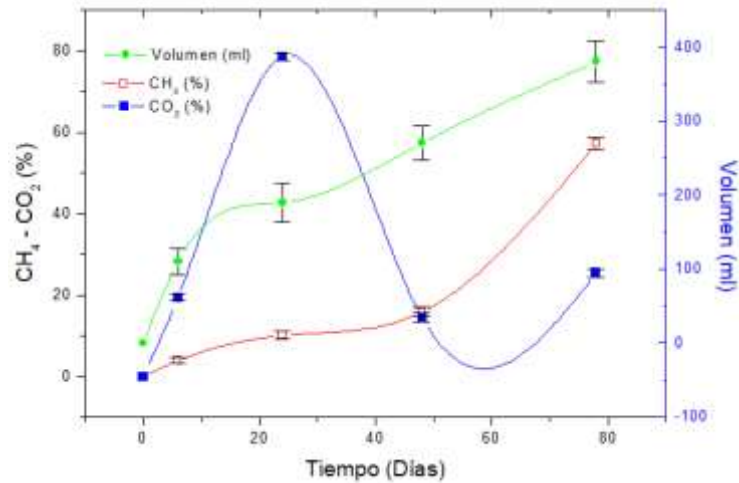
Figura 15. Porcentaje y volumen de biogás obtenido a partir de cáscara de papa, bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua en la experimentación N° 10.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 15 se observa la tendencia presente en la experimentación N° 10 de la relación entre CH₄, CO₂ el volumen de biogás obtenido y el tiempo de retención, con una concentración máxima de 58,74% de metano y un volumen total de 350 mL, después de 78 días de digestión el porcentaje de CO₂ aumenta de 19,85% a 26,46%.

Figura 16. Porcentaje y volumen de biogás por triplicado obtenido a partir de cáscara de papa, bagazo de caña de azúcar, sedimento y agua en la experimentación N° 10.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 16 se compararon los porcentajes de CH₄, CO₂ y volumen en el tiempo de retención establecido, mediante desviación estándar determinándose que no existe diferencias significativas en sus periodos de tiempo, es decir que, a los 6 días el CH₄ fue de 4,42% y 19,85% de CO₂, mientras que el tiempo transcurría y el volumen aumentaba hasta llegar al día 78 se evidencio un aumento 58,74% de CH₄ y 26,46% de CO₂.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

- Para la obtención de biogás se realizaron 10 codigestiones por triplicado con diferentes biomásas como se detalla a continuación, cáscaras de, papa, papaya, piña, arveja, banano, haba, bagazo de caña de azúcar, bagazo de caña de azúcar húmedo, bagazo de caña de azúcar semiseco y cáscara de papa con bagazo de caña de azúcar de las cuales la experimentación a escala laboratorio N° 8 con un contenido de bagazo de caña de azúcar húmedo (150,08 g), sedimento (75,23 g) y agua (150 mL), demostró mejores resultado mediante el análisis de cromatografía gaseosa.
- Los biodigestores tipo Batch a escala laboratorio y semipiloto se adecuaron a un sistema hermético, esto se realizó con el objetivo de evitar fugas y obtener un rendimiento adecuado de biogás, así mismo durante los 78 días de producción se trabajó a temperatura mesofílica (entre 25 y 35°C), siendo estas una de las condiciones óptimas para el proceso de digestión anaerobia.
- Mediante digestión anaerobia se logró determinar el contenido de los compuestos de biogás, de las 10 experimentaciones a escala laboratorio se obtuvo un mayor rendimiento en las siguientes experimentaciones, N° 7 con 80,85% de CH₄ y 17,43% de CO₂ en 625 mL; N° 8 con 96,06% de CH₄ y 3,57% de CO₂ en 675 mL; N° 9 con 91,39% de CH₄ y 8,17% de CO₂ en 750 mL; y N° 10 con 58,74% de CH₄ y 26,46% de CO₂ en 350 mL, con un tiempo de digestión final de 78 días. Mientras que en el biodigestor a escala semipiloto se obtuvo 1,53% de CH₄ y 98,17% de CO₂ en 1875 mL, con un tiempo de digestión de 48 días; este resultado se evidenció debido a un mayor contenido de biomasa en un menor tiempo de degradación.
- Como resultado del trabajo de investigación realizado se concluyó que el estudio de diferentes biomásas como el bagazo de caña de azúcar y residuos sólidos urbanos mediante codigestión producen un alto contenido de biogás, considerándose así una fuente de energía renovable lo que permite disminuir el impacto ambiental en las zonas aledañas al campo de estudio.

CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES

- Para la obtención de biogás con un mayor rendimiento de metano se recomienda realizar este proceso a temperaturas termofílicas (45 y 65°C) debido a que las bacterias metanogénicas que intervienen en la digestión anaerobia producen mayor cantidad de biogás en menor tiempo.
- Es importante fomentar la investigación y utilización de residuos orgánicos debido a su gran aporte para la obtención de biogás como fuente de energía renovable, lo cual puede ser implementado en zonas rurales.
- La investigación realizada destaca del alto rendimiento de metano obtenido de la codigestión de bagazo de caña de azúcar y sedimento del estero “El Macho” por lo que se recomienda emplear estos sustratos para la obtención de biogás.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Lora Grando, R.; de Souza Antune, A. M.; da Fonseca, F. V.; Sánchez, A.; Barrera, R.; Font, X. Technology Overview of Biogas Production in Anaerobic Digestion Plants: A European Evaluation of Research and Development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *80* (May), 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.079>.
- (2) Rosas, E.; Méndez, J.; Aguilar, A.; Vallejo, N.; Alvarado, A. Evaluation Of Bioenergy Potential From Citrus Effluents. *Clean. Prod.* **2020**, *32*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120128>.
- (3) Zhang, Q.; Wang, M.; Ma, X.; Gao, Q.; Wang, T.; Shi, X.; Zhou, J.; Zuo, J.; Yang, Y. High Variations of Methanogenic Microorganisms Drive Full-Scale Anaerobic Digestion Process. *Environ. Int.* **2019**, *126* (February), 543–551. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.005>.
- (4) Cortijo, L. Desarrollo de Un Biorreactor Anaerobio de Membrana Cerámica de Bajo Consumo Energético Para El Tratamiento de Aguas Residuales e Industriales de Alta Carga, Universidad Complutense de Madrid, 2018.
- (5) Mendoza, C. Plan de Minimización y Manejo de Residuos Sólidos Para Una Planta Cementera En Piura, Universidad de Piura, 2019.
- (6) Bravo, D.; Galarza, Y.; Baldeón, W.; Césare, M. Propuesta de Un Plan de Manejo de Residuos Solidos Peligrosos y No Peligrosos Para Una Empresa de Manufactura de Abrasivos. *An. Científicos* **2015**, *76* (1), 68–77.
- (7) Da silva, P. Aislamiento y Caracterización de Bacterias Metanogénicas de Sedimentos Urbanos Del Esto El Macho Mediante Un Enfoque de Ecosalud, Universidad Tecnica de Machala, 2019.
- (8) Wang, X.; Li, N.; Sun, W.; Xu, S.; Zhang, Z. Quantitative Analysis of Distributed and Centralized Development of Renewable Energy. *Glob. Energy Interconnect.* **2018**, *1* (5), 576–584. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.05.007>.
- (9) Fang, K.; Zhou, Y.; Wang, S.; Ye, R.; Guo, S. Assessing National Renewable Energy Competitiveness of the G20 : A Revised Porter ' s Diamond Model. *Renew. Sustain.*

- Energy Rev.* **2018**, 93 (May), 719–731. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.011>.
- (10) Londoño, A. Energías Renovables En Colombia : Una Aproximación Desde La Economía. *Rev. Ciencias Estrategicas* **2017**, 25, 375–390.
 - (11) Galan Riveros, X. F. Potencial Energético de La Biomasa Residual Agrícola En Colombia, Fundación Universidad de América, 2016.
 - (12) Almeida, E. De; Spogis, N.; Taranto, O. P.; Silva, M. A. Theoretical Study of Pneumatic Separation of Sugarcane Bagasse Particles. *Biomass and Bioenergy* **2019**, 127 (May), 14. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105256>.
 - (13) Pari, R. Reutilización de Plástico Pet, Papel y Bagazo de Caña de Azúcar, Como Materia Prima En La Elaboración de Concreto Ecológico Para La Construcción de Viviendas de Bajo Costo, Universidad Nacional de Trujillo, 2016.
 - (14) Candido, R. G.; Gonçalves, A. R. Evaluation of Two Different Applications for Cellulose Isolated from Sugarcane Bagasse in a Biorefinery Concept. *Ind. Crop. Prod.* **2019**, 142 (July), 9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111616>.
 - (15) Ribeiro, F. R.; Passos, F.; Vinícius, L.; Gurgel, A.; Eduardo, B.; Baêta, L.; Aquino, S. F. De. Anaerobic Digestion of Hemicellulose Hydrolysate Produced after Hydrothermal Pretreatment of Sugarcane Bagasse in UASB Reactor. *Sci. Total Environ.* **2017**, 6. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.170>.
 - (16) Nuntón, S. Influencia de La Temperatura y Ph En El Rendimiento de Obtención de Biogás a Partir de Bagazo de Caña y Estiércol de Equino Mediante Un Digestor Batch, Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo,” 2018.
 - (17) Zhou, X.; Xu, Y. Integrative Process for Sugarcane Bagasse Biorefinery to Co-Produce Xylooligosaccharides and Gluconic Acid. *Bioresour. Technol.* **2019**, 282 (159), 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.129>.
 - (18) Bertolo, M. R. V; Brenelli, L. B.; Paiva, D.; Nascimento, V. M.; Gandin, C. A.; Neto, M. O.; Driemeier, C. E.; Rabelo, S. C. Lignins from Sugarcane Bagasse : Renewable Source of Nanoparticles as Pickering Emulsions Stabilizers for Bioactive Compounds Encapsulation. *Ind. Crop. Prod.* **2019**, 140 (July), 12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111591>.

- (19) Condeña, E. Recuperación de Suelos Contaminados Con Plomo Mediante El Uso de Biocarbón de Bagazo de Caña de Azúcar En El Parque Chota Del AA.HH Ramón Castilla – Callao 2017, Universidad César Vallejo, 2017.
- (20) Forero Espinel, A. Revisión de Los Pretratamientos Ácido Diluido, Alcalino y Afex Aplicados a Diferentes Tipos de Biomosas, Universidad Nacional de Colombia, 2018.
- (21) You, X.; Wang, X.; Liang, C.; Liu, X.; Wang, S. Purification of Hemicellulose from Sugarcane Bagasse Alkaline Hydrolysate Using an Aromatic-Selective Adsorption Resin. *Carbohydr. Polym.* **2019**, *225* (April), 8. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115216>.
- (22) Campos, R. Bioconversion de Desperdicios Vegetales a Biogas a Partir de Microorganismos Ruminales. **2018**, *7*. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.13>.
- (23) Huang, T. H. Estudio de La Dependencia de La Temperatura En La Digestión Anaeróbica de Desechos de Fruta, Universidad San Francisco de Quito, 2015.
- (24) Diéz, H. Cálculo de La Estimación de Biogas Generado a Partir de Residuos Agroindustriales En El Principado de Asturias, Universidad de León, 2016.
- (25) Wasajja, H.; Lindeboom, R. E. F.; Lier, J. B. Van; Aravind, P. V. Techno-Economic Review of Biogas Cleaning Technologies for Small Scale off- Grid Solid Oxide Fuel Cell Applications. *Fuel Process. Technol.* **2020**, *197* (May 2019), 26. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106215>.
- (26) Benato, A.; Macor, A.; Rossetti, A. Biogas Engine Emissions: Standards and On-Site Measurements. *Energy Procedia* **2017**, *126*, 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.278>.
- (27) Montero, A. P. Analisis de La Implementacion Sostenible de La Producción de Energía Eléctrica a Partir de Biogás En Mexico, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2019.
- (28) Navarro, R. Obtención de Biogás a Partir de Residuos Agrícolas y de Producción de Biodiesel, Universidad de la Laguna, 2016.
- (29) Rosa, R. Producción de Biogás En Sustrato Sólido Mediante La Digestión Anaerobia de Pulpa de Cafe, Universidad Veracruzana, 2015.

- (30) Pramanik, S. K.; Suja, F. B.; Zain, S. M.; Pramanik, B. K. The Anaerobic Digestion Process of Biogas Production from Food Waste: Prospects and Constraints. *Bioresour. Technol. Reports* **2019**, 8 (July), 100310. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>.
- (31) Wu, L. J.; Kobayashi, T.; Kuramochi, H.; Li, Y. Y.; Xu, K. Q. Improved Biogas Production from Food Waste by Co-Digestion with de-Oiled Grease Trap Waste. *Bioresour. Technol.* **2016**, 201, 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.061>.
- (32) Cook, S. M.; Skerlos, S. J.; Raskin, L.; Love, N. G. A Stability Assessment Tool for Anaerobic Codigestion. *Water Res.* **2017**, 112, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.027>.
- (33) Yao, Y.; Huang, G.; An, C.; Chen, X.; Zhang, P.; Xin, X.; Jian Shen; Agnew, J. Anaerobic Digestion of Livestock Manure in Cold Regions: Technological Advancements and Global Impacts. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2019**, No. May, 109494. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109494>.
- (34) Zhang, Q.; Hu, J.; Lee, D. J. Biogas from Anaerobic Digestion Processes: Research Updates. *Renew. Energy* **2016**, 98, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>.
- (35) Arhoun, B. Digestión y Codigestión Anaerobia de Residuos Agrícolas, Ganaderos y Lodos de Depuradora, Universidad de Málaga, 2017.
- (36) Reyes Aguilera, E. A. Generación de Biogás Mediante El Proceso de Digestión Anaerobia , a Partir Del Aprovechamiento de Sustratos Orgánicos. *Medio Ambient. Tecnol. y Desarro. humano.* **2017**, 24, 60–81.
- (37) Ali Shah, F.; Mahmood, Q.; Maroof Shah, M.; Pervez, A.; Ahmad Asad, S. Retracted: Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis. *Sci. World* **2017**, 2017, 22. <https://doi.org/10.1155/2017/3852369>.
- (38) García, A.; Gómez, J. Evaluación de La Producción de Biogás a Partir de Residuos Vegetales Obtenidos En La Central de Abastos de Bogotá Mediante Digestión Anaerobia, Fundación Universidad de América, 2016.
- (39) Srisowmeya, G.; Chakravarthy, M.; Nandhini Devi, G. Critical Considerations in Two-

- Stage Anaerobic Digestion of Food Waste – A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2019**, No. June, 109587. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587>.
- (40) Parra Huertas, R. A. Anaerobic Digestión: Biotechnological Mechanisms in Waste Water Treatments and Their Application in Food Industry. *Prod. + Limpia* **2015**, *10* (2), 142–159.
- (41) Nuntón Núñez, S. H. Influencia de La Temperatura y PH En El Rendimiento de Obtención de Biogás a Partir de Bagazo de Caña y Estiércol de Equino Mediante Un Digestor Batch, Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo,” 2018.
- (42) Cuesta, J. Obtención de Biogás a Partir de Residuos Sólidos Urbanos Para Su Inyección a Red, Universidad Carlos III de Madrid, 2015. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10016/23542>.
- (43) Borja, R.; Rincón, B. Biogas Production. *Reference Module in Life Sciences*; 2017; pp 1–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.09105-6>.
- (44) Zorro, J.; Ruge, I.; Camargo, G. Prototipo de Biorreactor Aeróbico Para El Monitoreo y Control Del Proceso de Co-Compostaje, a Partir de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Sólidos Orgánicos de Plaza de Mercado. *Prospectiva* **2019**, *17* (1), 17–24. <https://doi.org/10.15665/rp.v17i1.1673>.
- (45) Gutiérrez, A. H.; Peña, L. B.; Díaz, J. G. H. Obtención de Biogás Mediante La Fermentación Anaerobia de Estiércol. *Rev. Estud. AGRO-VET* **2018**, *2* (2), 185–191.
- (46) Trelles Trelles, J. D. Cuantificación de Biogás Generado a Partir de Azúcares Reductores Totales (ART) Del Hidrólizado de La Cascarilla de Arroz, Mediante El Modelo de Gompertz, Universidad de Cuenca, 2019.
- (47) Adlard, E. R.; Poole, C. F. Gas Chromatography: Historical Development. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*; Elsevier Inc., 2018; pp 1–8. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.14294-5>.
- (48) Witkiewicz, Z.; Słomkiewicz, P. Inverse Gas Chromatography. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*; 2018; Vol. 4, pp 193–201. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.13976-9>.
- (49) Berezkin, V. G. Gas Chromatography/Gas–Solid Chromatography. *Reference Module*

in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering; Elsevier Inc., 2018; pp 1–6. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.14102-2>.

- (50) Romero, H.; Acaro, J.; Camacho, A.; Castillo, A.; Vega, C.; Dávila, K.; Gadvay, K. Confiabilidad de Un Método Para La Determinación de CO₂ Por Cromatografía de Gases. *Cumbres* **2017**, 3 (1), 41–46.
- (51) Maurus, K.; Ahmed, S.; Kazda, M. Beneficial Effects of Intermittent Feedstock Management on Biogas and Methane Production. *Bioresour. Technol.* **2020**, 304, 123004. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123004>.

ANEXOS

Anexo 1. Recolección y pretratamiento de la materia prima

Ilustración 1. Recolección de la biomasa (bagazo de caña de azúcar)



Ilustración 2. Recolección de los RSU (sedimento)



Ilustración 3. Remojo y cortado de la biomasa



Ilustración 4. Pesado de RSU y biomasa



Anexo 2. Adecuación y llenado de biodigestores

Ilustración 5. Llenado de los biodigestores a escala laboratorio



Ilustración 6. Llenado del biodigestor a escala semipiloto



Ilustración 7. Adecuación de los biodigestores



Ilustración 8. Experimentaciones de los biodigestores a escala laboratorio



Ilustración 9. Experimentación del biodigestor a escala semipiloto

