



c i d e t e q

CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
EN ELECTROQUÍMICA, S.C.

**Producción de biogás a través de la codigestión de residuos
sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para
la generación de energía.**

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

*Maestro en Ciencia y Tecnología
en la Especialidad de Ingeniería Ambiental*

PRESENTA

I.Q. Laura Angélica Briseño Arciniega



Santiago de Querétaro, Qro., México, Junio del 2017.



Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), bajo la dirección:

Dra. Linda Victoria González Gutiérrez



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dra. Erika Bustos Bustos
Subdirectora de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de Grado de la alumna LAURA ANGÉLICA BRISEÑO ARCINIEGA, una vez leída y revisada la Tesis “**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A TRAVÉS DE LA CODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS Y SEMISOLIDOS: HACIA UNA PLANTA CENTRALIZADA DE BIOGÁS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestría en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente el 24 del mes de mayo del año dos mil diecisiete.


Dr. Adrián Rodríguez García
Presidente


Dra. María Yolanda Reyes Vidal
Secretario


Dra. Nancy Velasco Álvarez
Vocal



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dra. Erika Bustos Bustos
Subdirectora de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la alumna LAURA ANGELICA BRISEÑO ARCINIEGA, una vez leída y revisada la Tesis “**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A TRAVÉS DE LA CODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS Y SEMISOLIDOS: HACIA UNA PLANTA CENTRALIZADA DE BIOGÁS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestría en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente el 24 del mes de Mayo del año dos mil diecisiete.

Dra. Linda Victoria González Gutiérrez

Dr. Adrián Rodríguez García

Dr. Roberto Contreras Bustos

Agradecimientos

La realización de éste trabajo fue posible gracias a CONACYT a través del financiamiento para los proyectos:

- Desarrollo de nuevos procesos para la producción de biogás a través de la codigestión de mezclas de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía. Convocatoria CONACYT-BMBF: C0005-BMBF-2013 Número: 000000000206788, en cooperación con la Universidad Técnica de Brandenburgo, Alemania Cottbus.
- Estudio de los fenómenos de transferencia electrónica extracelular, transporte de masa y cinética, en sistemas bioelectroquímicos microbianos: bioelectrodegradación/ bioelectro-síntesis”, con clave 256943 del Fondo de Ciencia Básica 2015. Responsable.

Principalmente por la beca académica que me fue otorgada por CONACYT durante el periodo 2014-2016.

En especial la Doctora Linda Victoria González por todo su apoyo durante este proyecto y haberme dado la oportunidad de participar en múltiples congresos adquiriendo experiencias memorables. También por haber seguido al pendiente sin perder la confianza en la culminación de nuestro proyecto.

A mi hijo Sebastian por esperarme cada día en casa y por ser el niño más valiente y comprensivo. A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional y por esperar orgullosamente cada uno de mis logros personales y académicos. A mi amiga Gretel por su compañía en ésta etapa de investigación y aun en la distancia.

Esta tesis siempre me va a recordar que perderse en el camino de una meta es fácil y volver a él es duro, es difícil y a veces duele, pero que es posible llegar y se siente bien al final.

Índice

Resumen	13
Abstract.....	14
1 INTRODUCCIÓN.....	15
2 MARCO TEÓRICO	17
2.1 Energías alternativas.....	17
2.2 Aprovechamiento de biomasa	17
2.3 Biorefinerías: un valor añadido al uso de la biomasa.....	18
2.4 Plantas centralizadas.....	19
2.5 Generalidades del biogás	20
2.5.1 Métodos de producción de biogás	21
2.5.2 Digestión anaerobia	22
2.5.3 Factores de operación y control durante la digestión anaerobia.....	24
2.5.3.1 Relación C/N (balance de nutrientes).....	25
2.5.3.2 Efecto del pH.....	26
2.5.3.3 Efecto de la temperatura.....	26
2.5.3.4 Ventajas de la digestión anaerobia	27
2.5.3.5 Desventajas.....	28
2.5.3.6 Subproductos del tratamiento anaeróbico.....	29

2.5.4 Biodigestores utilizados para la digestión anaerobia.....	30
2.6 Diferentes sustratos que producen biogás	31
2.7 Codigestión de sustratos	32
2.8 Inóculo microbiano.....	34
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	35
4 JUSTIFICACIÓN.....	36
5 HIPÓTESIS	37
6 OBJETIVOS.....	37
6.1 Objetivo general	37
6.2 Objetivos específicos.....	37
7 METODOLOGÍA.....	38
7.1 Equipo utilizado.....	38
7.1.1 Eudiómetros.....	38
Punto de medición gas.....	40
7.1.2 Reactor horizontal.....	40
Válvula de medición de gas.....	41
Termostato	41
Controles de Agitación y Temperatura.....	41
Tablero indicador.....	41

FIGURA 5 REACTOR PILOTO HORIZONTAL CON AGITACIÓN.....	41
7.1.3 Medidor de gas portátil.....	41
7.2 Recolección de los sustratos.....	42
7.3 Caracterización de los sustratos.....	42
7.4 Pruebas en eudiómetro.....	43
7.4.1 Cálculo de la cantidad (g) de sustrato para cada prueba.....	44
7.4.2 Mediciones del biogás.....	45
7.4.3 Cálculos para la producción diaria de biogás en los eudiómetros.....	46
7.4.4 Volumen de biogás generado en cm ³ diariamente.....	47
7.4.5 Suma de volúmenes de gas específicos.....	47
7.4.6 Producción de metano.....	49
7.4.7 Suma de la producción de metano específica y total.....	50
7.5 Selección de los sustratos en codigestión, con mayor generación de biogás.....	51
7.6 Operación de codigestión de residuos en biodigestor horizontal.....	52
7.6.1 Producción de biogás.....	52
8 RESULTADOS.....	54
8.1 Caracterización de codigestantes.....	54
8.2 Composición de los cosustratos para los experimentos en eudiómetros.....	54
8.3 Resultados de los experimentos en eudiómetros.....	57

8.4	Resultados de la operación en el biodigestor horizontal agitado.....	68
8.4.1	Medición de biogás.....	71
9	CONCLUSIONES.....	77
10	RECOMENDACIONES	78
11	BIBLIOGRAFÍA	79
12	ANEXOS	82

Índice de Figuras

Figura 1 Proceso integral para producción y usos del biogás.....	30
Figura 2 Metodología	38
Figura 3 Eudiómetro SELUTEC	39
Figura 4 Esquema del Eudiómetro SELUTEC.....	40
Figura 5 Reactor horizontal con agitación piloto.	41
Figura 6 Medidor de gas portátil	41
Figura 7 Esquema del biodigestor con sistema de medición de biogás por desplazamiento de volumen.	52
Figura 8 Montaje del Biodigestor con sistema de medición de gas por el método volumétrico	70

Índice de gráficas

Gráfica 1 Cambio de pH en los cosustratos, antes y después de la digestión, experimento 1 ..	58
Gráfica 2 Cambio de pH en los cosustratos, antes y después de la digestión, experimento 2. .	59
Gráfica 3 Cambio de pH en los cosustratos, antes y después de la digestión, experimento 3. .	59
Gráfica 4 Remoción de Sólidos Volátiles en los cosustratos experimentos 1-3	60
Gráfica 5 Remoción de Sólidos Volátiles en los cosustratos experimentos 1-3	61
Gráfica 6 Incremento de Nitrógeno amoniacal de los cosustratos experimentos 1-3	62
Gráfica 7 Porcentaje de metano generado por cada cosustrato durante la digestión. Experimentos 1-3.....	66
Gráfica 8 Producción de biogás L/KgSV durante la digestión. Experimentos 1-3.....	67
Gráfica 9 pH durante la digestión.....	71
Gráfica 10 Producción de biogás promedio diario	72
Gráfica 11 Porcentaje de metano contenido en el biogás durante la digestión en el reactor.....	72
Gráfica 12 Remoción de sólidos volátiles	73
Gráfica 13 Remoción de DQO	74
Gráfica 14 Eficiencia de remoción como DQO y SV en el reactor horizontal	74

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de valores caloríficos para diferentes combustibles. (Hill,2011).....	21
Tabla 2 Relación C/N de los sustratos empleados comúnmente para la producción de biogás	25
Tabla 3 Algunos residuos sólidos y semisólidos utilizados para la codigestión anaerobia y rendimientos reportados en literatura.	33
Tabla 4 Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica (Langrange, 1979)	
Tabla 5 Caracterización inicial de sustratos.	54
Tabla 6 Composición inicial de los cosustratos, para experimentos en eudiómetros, Exp.1	55
Tabla 7 Composición inicial de los cosustratos, para experimentos en eudiómetros, Exp.2	56
Tabla 8 Composición inicial de los cosustratos, para experimentos en eudiómetros, Exp.3	57
Tabla 9 Producción de biogás durante 27 días de digestión. Experimento 1	63
Tabla 10 Producción de biogás durante 27 días de digestión. Experimento 2	64
Tabla 11 Producción de biogás durante 27 días de digestión. Experimento 3	64
Tabla 12 Composición de las cargas C1, C2 Y C3 en el biodigestor.....	68
Tabla 13 Rendimiento de Materia orgánica en términos de ml de biogás por gramo de materia orgánica (cosustrato).....	75

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo del sustrato.....	44
Ecuación 2 Producción diaria de biogás.....	46
Ecuación 3 Normalización del gas	46
Ecuación 4 Presión de vapor del agua	47
Ecuación 5 Cálculo del Volumen diario de biogás.....	47
Ecuación 6 Suma de volúmenes de gas específicos	48
Ecuación 7 Cálculo de la producción de biogás en NLitros/kg Masa Fresca	49
Ecuación 8 Cálculo de la cantidad de metano en la prueba en NL	49
Ecuación 9 Cálculo de la cantidad de metano en el inóculo en NL	50
Ecuación 10 Producción específica de metano.....	50

Resumen

Una biorefinería es una instalación industrial que aprovecha la biomasa de forma sostenible para la obtención de otros productos como el biogás, que es un bioenergético capaz de sustituir a los combustibles fósiles, generando una fuente de energía renovable, mediante tecnologías limpias que permiten conservar el medio ambiente. Ya que México es un importante generador de excretas y que su incorrecta disposición final ha provocado problemas ambientales como contaminación del agua, suelo y aire, se pretende aprovechar diferentes residuos generados del sector agropecuario como fuente de biomasa para la obtención de biogás. El objetivo es estudiar la codigestión de residuos de distinta naturaleza que se complementen para una mejor codigestión, enfocado al diseño de una planta centralizada para producción de biogás.

Se comenzó con la caracterización de los sustratos en cuanto a pH, SV, DQO, y Nitrógeno. Posteriormente como cosustratos, bajo la metodología: Determinación de biogás y el potencial de producción de metano, basado en la norma Alemana, VDI-4630 en pruebas de fermentación en eudiómetros y posteriormente alimentó un bioreactor para determinar el rendimiento de producción de biogás, a partir de los resultados obtenidos durante la primera etapa de experimentos en eudiómetros. Finalmente se hicieron recomendaciones de operación en cuanto a las proporciones óptimas de los sustratos en codigestión para la planta piloto que operará como una planta centralizada en instalaciones de CIDETEQ.

Como sustratos se usaron excretas de vaca y cerdo, pollinaza, suero de leche y grasa residual, la mezcla de cosustratos con mayor generación de biogás fue: Estiércol de vaca (80%)/Grasa (20%), inoculada con lodo anaerobio, Producción de biogás de 72.1 L/KgVs y 80% de CH₄, TRS de 27 días. Presentó remoción de SV y DQO de 91% y 97% respectivamente. Para la codigestión de residuos se debe buscar la composición ideal en las proporciones de la mezcla buscando que se complementen sus características y de esta manera se aprovechen para producir biogás de mejor calidad.

Abstract

A biorefinery is an industrial facility that takes advantage of biomass in a sustainable way to obtain other products such as biogas, which is a bioenergy capable of replacing fossil fuels, generating a source of renewable energy, using clean technologies to conserve the environment. Since Mexico is a major source of excreta and its final wrong disposal has caused environmental problems (such as water, soil and air pollution), it is intended to take advantage of different residues generated from the agricultural sector, as a source of biomass, to obtain biogas. The objective of this work is to study the codigestion of different types of residues that are complemented for a better codigestion, focused on the design of a centralized plant for the production of biogas.

This project began with the characterization of the substrates in terms of pH, SV, COD, and Nitrogen. Subsequently, as co-substrates, under the methodology: Determination of biogas and methane production potential based on the German standard, VDI-4630 in fermentation tests in eudiometers and later, fed a bioreactor to determine the yield of biogas production from the results obtained during the first stage of eudiometer experiments. Finally, operational recommendations were made regarding the optimum proportions of the substrates in codigestion for the pilot plant that will operate as a plant centralized in CIDETEQ installations.

Cow, chicken and pig manure, whey and residual fat were used as substrates; the mixtures with the highest biogas generation were: Cow manure (80%) / Fat (20%), inoculated with anaerobic sludge, Production Of biogas of 72.1 L / KgVs and 80% of CH₄, TRS of 27 days. It presented SV and COD removal of 91% and 97% respectively. For the codigestion of residues, it is necessary to look for the ideal composition in the proportions of the mixture looking for a complement of their characteristics and, in this way, to take advantage in the production of biogas in a better quality.

1 INTRODUCCIÓN

La descomposición de materia orgánica por la vía anaerobia (en ausencia total de oxígeno) genera gas combustible. Este gas contiene una alta proporción en metano (CH_4) en concentración superior al 60 %, con una potencia calorífica inferior del orden de 5.500 Kcal/m^3 , y se designa usualmente como biogás. Todo proceso de digestión anaerobia lleva una eliminación/depuración de la carga orgánica. Las instalaciones especialmente diseñadas para optimizar este proceso se designan como “digestores de metano”, “plantas de biogás” o simplemente “reactores anaerobios” (Flotats, X.).

Los procesos anaerobios deben ser perfeccionados mediante la optimización del uso de biomasa; por ejemplo, una alternativa es la utilización de residuos en codigestión. La biomasa más común son los residuos alimenticios, estiércol de ganado, agroindustriales, de procesado de alimentos vegetales o animales, residuos sólidos urbanos Y los residuos vegetales de las cosechas. De los anteriores se han tenido excelentes rendimientos de biogás a partir de diversos estiércoles, específicamente de ganado ovino, por ejemplo, la digestión de estiércol como sustrato único tiene una alta producción de microorganismos anaeróbicos y de biogás pero de baja calidad de metano, como resultado. Es frecuente que se lleve a cabo una codigestión con otro tipo de sustratos que posean altas producciones de biogás, tales como residuos alimentarios o agroindustriales, de esta manera se persigue balancear sus características como por ejemplo controlando el pH se evita que durante la fermentación se presente una acidificación y se inhiba la metanogénesis. Por lo tanto en este trabajo se pretende encontrar una codigestión eficiente entre una selección de residuos agroindustriales, logrando su aprovechamiento mediante codigestantes, donde se complementen entre sí para producir un buen flujo de biogás que contenga principalmente metano. Utilizando la biomasa disponible de una misma región, por dos razones: la primera, se debe a la composición de la biomasa específica de la situación geográfica, por ejemplo, la composición de estiércol depende principalmente del sistema digestivo del animal y de su dieta, la especie del animal y edad al igual que las condiciones climáticas. Por consiguiente, este proyecto considera importante el investigar el potencial de biogás y metano de diferentes biomásas, todas de la misma región. La segunda, se debe a que al utilizar la biomasa residual de industrias cercanas, se logrará encontrar la composición ideal que genere biogás de mayor calidad a partir de dichos residuos en específico, logrando beneficios

como el aprovechamiento de la energía obtenida para los generadores en el marco de un biodigestor o una planta de biogás centralizados, siendo una medida factible para aprovechar los residuos y producir energía. Además, el aprovechamiento de los residuos de distintas agroindustrias, y la instalación de una planta centralizada de tratamiento de residuos y producción de biogás beneficiaría a dichas industria participantes a tener reducciones en costos y en energía lo que se traduce a mayor inversión en la zona.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Energías alternativas

Las energías alternativas son aquellas que no implican la quema de combustibles fósiles para su generación, además de ser indispensables para asegurar la sustentabilidad y cuidado del medio ambiente. La contaminación atmosférica ha sido una constante evolutiva a través de los años y a medida que esta crece también se incrementa la necesidad de disminuirla para mejorar la calidad de vida de los seres vivos. A causa de esto se considera generar energías alternativas las cuales permitan suplir las necesidades del ser humano a partir de la utilización de los recursos naturales existentes. Una de las energías alternativas que en la actualidad ha estado en constante estudio y evolución es la producción de biogás a partir de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos (Masera, Omar 2010).

Debido a la falta de capacidad técnica y financiera, México presenta un retraso significativo en el despliegue de energías renovables a pesar de su potencial privilegiado.

2.2 Aprovechamiento de biomasa

El término biomasa se le atribuye a toda la fracción orgánica de los residuos provenientes de diferentes procesos productivos, y que puede ser potencializado como materia prima para la obtención de diferentes combustibles verdes o biocombustibles, conocidos así por proponer formas de energía renovables no dependientes del carbono. La biomasa fue la principal fuente de energía hasta el siglo XIX, sin embargo, el uso de este combustible con la revolución industrial fue menguando progresivamente comenzando la era de los combustibles fósiles.

La biomasa ha ganado la atención en todo el mundo como una fuente de energía renovable para la conversión termoquímica (Aysu y Küçük, 2014; Damartzis y Zabaniotou, 2011; Wei et al., 2006), su aprovechamiento ofrece beneficios a nivel local como una forma de eliminar los residuos y desechos, y los beneficios globales mediante la reducción de las emisiones de efecto invernadero (Yusoff, 2006). Una gran cantidad de investigación se ha centrado en los aspectos

técnicos de la producción de bioenergía, como los factores óptimos de oxígeno, temperatura del aire, relación aire-combustible, presión de trabajo, tamaño de las partículas de biomasa, presión, etc. se ha confirmado que la co-combustión de biomasa en las plantas existentes, especialmente las plantas que funcionan con carbón, es una opción técnicamente viable (Ponton, 2009). Mientras que los residuos de biomasa pueden reemplazar más del 50 % de carbón en centrales térmicas de carbón con grandes inversiones de capital (Inglés et al, 1981), hasta el 20% de la biomasa puede ser coalimentadas con carbón sin modificación significativa de los equipos actuales (Grabowski, 2004 y Haq, 2002).

2.3 Biorefinerías: un valor añadido al uso de la biomasa

La producción de bioproductos es un mercado en constante expansión con aplicaciones en la industria farmacéutica, química, papelería y alimentaria, pero precisa aún de un desarrollo tecnológico que permita obtener estos productos a un costo menor y de una manera más eficiente. Íntimamente ligado a este mercado, se encuentra el concepto de biorefinería, término que engloba la integración de procesos y tecnologías para un uso eficaz de las materias primas y así lograr instalaciones que operen de una manera sostenible con el medio ambiente.

Algunas de las definiciones encontradas en la literatura de este término describen la biorefinería como:

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) define la biorefinería como la instalación donde se generan, de forma sostenible, un amplio espectro de productos de interés comercial a partir de la biomasa.

También se pueden definir como “Industrias integradas de productos de base biológica, que utilizan diversas tecnologías para producir sustancias químicas, biocombustibles y bioenergía, productos alimentarios y biomateriales empleando como materia prima biomasa” (Deyanira Muñoz y col, 2014).

De esta manera, el concepto de biorefinería se puede atribuir a dos ideas: un aprovechamiento de todos los componentes de la biomasa para generar un amplio espectro de combustibles renovables, o el establecimiento de plantas centralizadas formados por industrias participantes

que contribuyan con los residuos de sus procesos productivos y se convierten en materia prima para la biorefinería en forma de biomasa.

2.4 Plantas centralizadas

La codigestión entre diversos residuos, ya sean industriales (orgánicos y lodos), agrícolas (residuos de frutas y verduras) o residuos sólidos urbanos son una opción adecuada para mejorar la producción de biogás (Amon et al, 2006;.. Macias-Corral et al, 2008; Marañón et al, 2009). Por ejemplo en las plantas de biogás centralizadas (Angelidaki y Ellegaard, 2003), el estiércol es transportado, principalmente en forma de suspensión, a partir de un número de granjas cercanas a la planta, donde es codigerido con otros residuos orgánicos procedentes de las industrias del mismo municipio. Las ventajas de utilizar la codigestión de purines de ganado vacuno con los residuos de alimentos, la búsqueda del mayor rendimiento en términos de productividad volumétrica de gas, las estrategias para la economía del proceso y los beneficios ambientales, se han discutido recientemente por Banks et al. (2011), que evalúa la viabilidad de pre-procesamiento de residuos de alimentos por separado para transportarlos a las plantas centralizadas, y ser procesados con purín de ganado vacuno lechero en codigestión anaerobia, los resultados mostraron que la adición de residuos de alimentos mejoró el rendimiento de energía por unidad de volumen en el digestor, con un aumento del potencial correspondiente para la mejora de los ingresos agrícolas hasta un 50%. A continuación se mencionan algunos resultados de estudios similares realizados en la última década:

El potencial de producción de biogás a partir de estiércol y diferentes codigestantes de estiércol y residuos de alimentos usando digestores discontinuos a 35 °C fueron estudiados por El-Mashad y Zhang (2010). El rendimiento de metano del estiércol y dos codigestantes de estiércol y residuos de alimentos (68/32 y 52/48) después de 30 días de la digestión, fue 241, 282 y 311 L / kg VS, respectivamente.

Por su parte Capela et al. (2008) evaluaron la viabilidad técnica de microorganismos mesófilos en codigestión anaerobia con tres tipos de residuos: la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, lodos y el estiércol del ganado industrial, la obtención de mayores rendimientos de

biogás y una mayor reducción de sólidos volátiles al aumentar la proporción de residuos sólidos municipales.

En otro estudio, Macias-Corral et al. (2008) usaron la co-digestión anaerobia de estiércol de vaca lechera, la fracción orgánica de los residuos municipales y residuos de una desmotadora de algodón. La máxima producción de biogás se obtuvo con estiércol de vaca y de los residuos desmotadora de algodón (87 m³ de metano / tonelada de residuo seco).

Y adicionalmente Callaghan et al. (2002), realizó el estudio de la codigestión de lodos de ganado con residuos de frutas y vegetales (FVW) y estiércol de pollo, se encontró que el aumento de la proporción de FVW de 20% a 50% mejoró el rendimiento de metano 0,23-0,45 m³ CH₄ /kg VS adicional.

2.5 Generalidades del biogás

El biogás es un gas combustible que se puede obtener a partir de la biomasa, tal como son los residuos urbanos, residuos agrícolas, y de los efluentes de tratamiento de aguas. Este gas puede ser utilizado, por ejemplo, como combustible para generar electricidad o para generar energía calorífica demostrando ser un bioenergético capaz de sustituir a los combustibles fósiles en la generación de energía (Gutiérrez García y col, 2001).

Lo constituye una codigestantes de gases combustibles y su composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción y de las condiciones de operación de los reactores donde se obtiene. El biogás contiene aproximadamente 60% de metano y 40% de dióxido de carbono y una pequeña cantidad de ácido sulfhídrico el cual produce un olor a huevo podrido. El valor calorífico del biogás es de entre 20 – 30 MJ de energía calórica por m³ de gas. 23 MJ/Kg (Lombardi et al., 2009), lo que lo hace un combustible competitivo con los que se utilizan actualmente. En la **Tabla 1** se muestra una comparación de la emisión directa de CO₂ respecto a otros combustibles y sus valores caloríficos.

Tabla 1 Comparación de valores caloríficos para diferentes combustibles. (Hill,2011).

Combustible	Valor Calorífico (CV) aproximado	Factor de emisión indirecto (KgCO ₂ e/GJ, CV neto)
Petróleo	45,21 MJ/Kg	12,51
Gas Natural	36 MJ/Kg	5,55
Gas Natural Licuado	55,14MJ/Kg	20
Keroseno	43,12 MJ/Kg	13,34
Diésel	44,79 MJ/Kg	13,13
Biogás	23 MJ/Kg	0,246 ^b

Es importante destacar que el biogás se encuentra por debajo de los combustibles comparados en el factor de emisión directa de CO₂, lo que lo posiciona como una opción menos contaminante a la atmósfera. (Hill, 2011).

2.5.1 Métodos de producción de biogás

El mecanismo predominante para la conversión de la biomasa en biogás es la conversión bioquímica o digestión de biomasa orgánica que debe entenderse como un proceso natural que involucra varios procesos bacterianos simultáneamente.

El método más común de producción de biogás es la digestión anaerobia, por medio de microorganismos en ausencia de oxígeno. Uno de los sistemas más comunes en los que se lleva a cabo, es en tanque cerrado llamado ‘biodigestor’. La codigestión de la biomasa en el digestor con agua para formar una suspensión, en la cual la digestión anaerobia se realiza en dos pasos. En el primer paso, llamado licuefacción, la materia orgánica es descompuesta por hidrólisis enzimática y fermentada para producir principalmente ácidos y alcoholes. El segundo paso, llamado gasificación, las bacterias metanogénicas rompen los ácidos y los alcoholes, para producir metano y dióxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico (Gutierrez García y col, 2001).

Las vías microbiológicas de producción de energía a partir de sustratos biológicamente degradables representan una excelente alternativa para la sustitución de combustibles fósiles no renovables que se utilizan en la actualidad. Esto es especialmente interesante dentro del campo de las instalaciones agroindustriales las que pueden cubrir una parte de sus necesidades energéticas a partir de sus propios residuales, para complementar o reemplazar los combustibles fósiles, por lo tanto la digestión anaerobia se presenta como el método más ventajoso en el tratamiento de aguas residuales y de residuos orgánicos, para aprovecharse en la generación de biogás.

La composición química del biogás es determinada por la naturaleza del sustrato y las condiciones de operación de la digestión anaerobia. Es una combinación de gases inflamables generados por un grupo de bacterias anaerobias específicas en la descomposición de compuestos orgánicos (digestión anaerobia), contiene de 50-70% de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), junto con estas algunas trazas de hidrógeno (H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). (IDEA 2007).

2.5.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás por un consorcio de bacterias que son sensibles al oxígeno, por medio de este proceso es posible convertir en subproductos útiles gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico y como producto final se obtiene un bioabono inocuo más estable (Gropelli, E. 2008). Los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorias y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo. La

digestión anaerobia Consta de cuatro fases que son llevadas a cabo por un grupo específico de bacterias las cuales son descritas brevemente a continuación.

2.5.2.1 Hidrólisis

Durante esta etapa las moléculas o grandes polímeros son reducidos de tamaño, pasan de ser moléculas complejas solubles e insolubles como carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos que no pueden ser directamente metabolizados por los microorganismos anaerobios, a ser monómeros o moléculas más pequeñas y simples. (Vavilin et al., 2008).

2.5.2.2 Acidogénesis y acetogénesis

En esta etapa los monómeros liberados anteriormente son degradados mediante reacciones fermentativas, en donde los compuestos orgánicos funcionan como aceptores y donadores de electrones. Los principales productos de esta etapa son ácidos grasos volátiles (AGV), que son intermediarios del proceso de degradación; el ácido acético es el mayor intermediario en la cadena alimenticia anaerobia (Drake et al., 2002; Müller, 2003), otros ácidos principales del proceso son el ácido propiónico y láctico, y se pueden formar algunos alcoholes. Los precursores directos para la formación de metano (CH_4) son el ácido acético, fórmico, H_2 y CO_2 (Grady et al., 1999; Baserba et al., 2012). En la etapa de metanogénesis se presenta la formación del CH_4 , el cual es el último producto de la digestión anaerobia limitado a tres tipos de precursores: CO_2 , compuestos que contengan un grupo metilo y acetato (Liu y Whitman, 2008). Todos los metanógenos son estrictamente arqueas anaerobias oxígeno-sensibles, que pertenecen al phylum Euryarchaeota (Liu y Whitman, 2008).

La naturaleza y la composición química del sustrato condicionan la composición cualitativa de la población bacteriana de cada etapa, de manera que se establece un equilibrio fácilmente rompible cuando algún tóxico no permite el desarrollo de alguna de las poblaciones. Mientras que en las fases de hidrólisis-acidogénesis los microorganismos involucrados suelen ser facultativos, para la tercera fase los microorganismos son estrictos, y con tasas máximas de crecimiento del orden de 5 veces menores a las acidogénicas. Esto significa que si las bacterias metanogénicas tienen algún problema para reproducirse y consumir los ácidos, estos se

acumularán, empeorando las condiciones para las bacterias metanogénicas, responsables de la producción de metano (Gutierrez García y col, 2001).

Las características físicas y químicas de los residuos sólidos orgánicos son de trascendental importancia para la correcta selección del tipo de proceso de fermentación. Los desechos sólidos orgánicos generados en los mercados tienen contenidos de humedad alrededor del 86 %, así como un pH predominantemente ácido. Estas dos características sugieren que la digestión anaerobia es el proceso de fermentación más idóneo. (Buenrostro O. 2000)

2.5.3 Factores de operación y control durante la digestión anaerobia

Diferentes parámetros físicos y químicos siempre están presentes en los procesos anaerobios; siendo los factores principales que influyen en el proceso, los siguientes (Montalvo M. 2000):

- Composición del residual.
- Someter el proceso a cargas orgánicas y tiempos de retención hidráulica y celular compatibles con el residuo a ser digerido y con el tipo de digester empleado.
- Temperatura: No ocurrencia de variaciones bruscas de temperatura. Se encuentra un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35 °C.
- Acidez: determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6, que se logra a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes.
- Contenido en sólidos: se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10 % de sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.
- Nutrientes: para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
- Existencia de cantidades de nitrógeno (N) y fósforo (P) en el residuo, compatibles con la cantidad de carbono.

2.5.3.1 Relación C/N (balance de nutrientes)

Existe una amplia diversidad de criterios acerca de cuál es la relación óptima que debe existir entre la materia orgánica a degradar (carbono) y la cantidad de los principales macronutrientes en un proceso anaerobio, dependiendo ésta en gran medida del tipo de sustancias de que esté compuesto el residuo.

Como regla general, se plantea que el contenido C:N:P debe ser cercano a 100:1.75:0.25 en base a la Demanda Química de Oxígeno (DQO). En muchas ocasiones, se puede lograr un buen balance mezclando diferentes residuos. Si el nitrógeno está en exceso puede producirse mucho amoníaco lo cual puede inhibir el proceso anaerobio por encima de ciertos niveles (3 kg./m³). Sin embargo, existen algunos trabajos donde se reportan algunas concentraciones tolerantes de 4 a 9 kg/m³ de nitrógeno en procesos anaerobios (Ruiz I., 2002)

Los microorganismos siempre consumen estos elementos, debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 20-30/1. Así como además requiere algunos minerales como nutrientes.

En la **Tabla 2** se presenta la caracterización teórica de diferentes sustratos, en donde se observa a los sustratos que se encuentran dentro de la proporción C/N recomendada, son el estiércol de vaca y estiércol de oveja.

Tabla 2 Relación C/N de los sustratos empleados comúnmente para la producción de biogás

Sustrato	Contenido de carbono por peso (%)	Contenido de nitrógeno por peso (%)	Relación carbono a nitrógeno (C/N)
Lodos anaerobios	40	4	10/1
Estiércol de aves	41	1.3	32/1
Suero de leche	10	11.7	0.85/1
Estiércol fresco de oveja	16	0.55	29/1
Estiércol fresco de vaca	7.3	0.29	25/1
Estiércol fresco de cerdo	7.8	0.6	13/1

c

2.5.3.2 Efecto del pH

Los efectos del pH se reflejan en la actividad enzimática de los microorganismos. Las formas generales en que el pH influye en la actividad microbiana pueden resumirse en las siguientes:

- Cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminos).
- Alteración de los compuestos no enzimáticos del sistema (ionización del sustrato, desnaturalización de la estructura proteica de la enzima).

A estos efectos del pH deben adicionarse la concentración de H^+ que influye sobre las diferentes reacciones químicas, bioquímicas y biológicas que ocurren en este sistema. Se plantea en general que el valor óptimo de pH para la digestión anaerobia es 7. En la práctica se ha visto que al alejarse de este valor, la eficiencia del proceso disminuye, (Ghosh S. 1988).

2.5.3.3 Efecto de la temperatura

Este parámetro influye de manera decisiva en el proceso anaerobio, ya que de él depende mucho las velocidades de reacción con las que se lleva a cabo cualquier proceso biológico, la composición del biogás debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura y el daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio después de ciertos valores de ésta, (Ghosh S. 1988). Se han definido dos rangos de trabajo donde puede efectuarse satisfactoriamente la anaerobiosis de aguas residuales. Ellos son los siguientes (Montalvo M. 2000):

- Mesofílico entre 20 y 45 °C.
- Termofílico entre 45 y 60 °C.

La temperatura óptima en cada uno de estos rangos es difícil de predecir, ya que depende del tipo de residual, de las condiciones ambientales, etc. No obstante, se reconocen en general como temperaturas óptimas las de 35 y 55 °C para los tratamientos mesófilos y termófilos, respectivamente (Obaya y col, 1991).

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura, su velocidad de reacción depende de la velocidad de crecimiento

de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios (Tabla 3).

Tabla 3 Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica (Langrange, 1979)

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrofílica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesofílica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

En este trabajo, la digestión anaeróbica se mantuvo a temperatura mesofílica dentro de su rango máximo, controlando $37^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y con un tiempo de fermentación de 30-32 días.

El tiempo de retención es el cociente entre el volumen del reactor y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos. Hay dos tipos de tiempo de retención, el tiempo de retención de sólidos (TRS), que es el tiempo promedio en que las bacterias están en el digestor, y el tiempo de retención hidráulico (TRH), que es el tiempo promedio en que el lodo líquido se mantiene en el digestor. Según Gerardi (2003), el tiempo de generación de metanogénicos puede ser de 3 a 30 días.

2.5.3.4 Ventajas de la digestión anaerobia

El tratamiento anaerobio de las aguas residuales de producciones alimenticias, de las bebidas y de las industrias farmacéuticas tiene muchas ventajas comparadas a otros métodos de tratamiento: (Ruiz I. 2002)

- El consumo de energía es muy bajo con el tratamiento anaerobio. Por ejemplo, no tiene que ser provisto oxígeno y no es necesario un mezclado intenso.
- La mayoría del material orgánico en el agua residual se convierte en biogás, que puede ser combustionado con el fin de obtener energía o vapor. La energía se puede utilizar en la planta de producción de biogás o se puede proveer a la red de la energía.

- La producción de lodo en el tratamiento anaerobio es muy baja (ya estabilizados y espesados), porque la mayoría del material orgánico se convierte en biogás, no en lodo. Además, el lodo anaerobio se estabiliza y se puede desecar fácilmente por gravedad.

Se puede utilizar para la arrancada de nuevos reactores anaerobios, o se puede utilizar como bioabono en la tierra. Los gastos de transportación del lodo son por consiguiente mínimos.

- Son sistemas que asimilan altas y bajas cargas orgánicas.
- La remoción de materia orgánica se encuentra entre el 60 y 80 % según el tipo del residual.
- El lodo anaerobio puede ser almacenado y conservado fácilmente, lo que simplifica los arranques sucesivos después de paradas o los períodos con cargas orgánicas reducidas.
- Existe la posibilidad de trabajar a tiempos de retención hidráulicos muy bajos, o lo que es igual, se necesitan menores volúmenes de instalación, abaratando las inversiones.
- Los costos de inversión son bajos, porque se aplican altas cargas orgánicas al reactor y los tiempos de la retención son cortos. El tratamiento anaerobio es lo más comúnmente aplicado como pre-tratamiento para las aguas residuales concentradas. Los efluentes en el tratamiento anaerobio todavía contienen un poco de material orgánico, a pesar de la altas eficacias de tratamiento por lo que el post-tratamiento es necesario en muchos casos.

2.5.3.5 Desventajas

- El proceso anaerobio no permite conseguir la calidad de efluente que se puede alcanzar en una planta de lodos activos y otros sistemas aerobios, pero sí permite eliminar gran parte de los SS (Sólidos en suspensión) y de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) y/o DBO5 (Demanda Biológica de Oxígeno 5), incluso en una sola etapa, que sustituiría al decantador primario, al digester de lodos activos (aerobio) y al digester anaerobio de estabilización de lodos. (Ruiz I. 2002)
- Requerimiento de un lodo granular para arranques rápidos. Arranque lento (seis meses) en caso de no contar con lodos inoculados.
- En ocasiones, hay presencia de malos olores, para lo cual se requiere de un sistema simple de control.

2.5.3.6 Subproductos del tratamiento anaeróbico

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, trabajando en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y un efluente estabilizado.

Las características del efluente, dependen mucho del tipo de sistema, pero tratando con sistemas de mezcla completa y con residuos orgánicos, se puede decir que el efluente es la mezcla del influente estabilizado y la biomasa microbiana producida.

Durante el proceso anaerobio parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor que en el influente. Se trata, además, de un producto más mineralizado que el influente, con lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico.

Cuando el estiércol animal se usa como sustrato en los biodigestores, generalmente en los de diseño convencional, práctica muy difundida en la zona rural, el efluente líquido puede ser utilizado como bioabono debido a aspectos como son la disminución de la relación C/N y la solubilización de algunos nutrientes (Mansur A, 2004).

La promoción e implantación de sistemas de producción de biogás colectivos (varias granjas), y de codigestión (tratamiento conjunto de residuos orgánicos de diferentes orígenes en una zona geográfica, usualmente agropecuarios e industriales) permite, además, la implantación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas, con beneficios sociales, económicos y ambientales **Figura 1.**

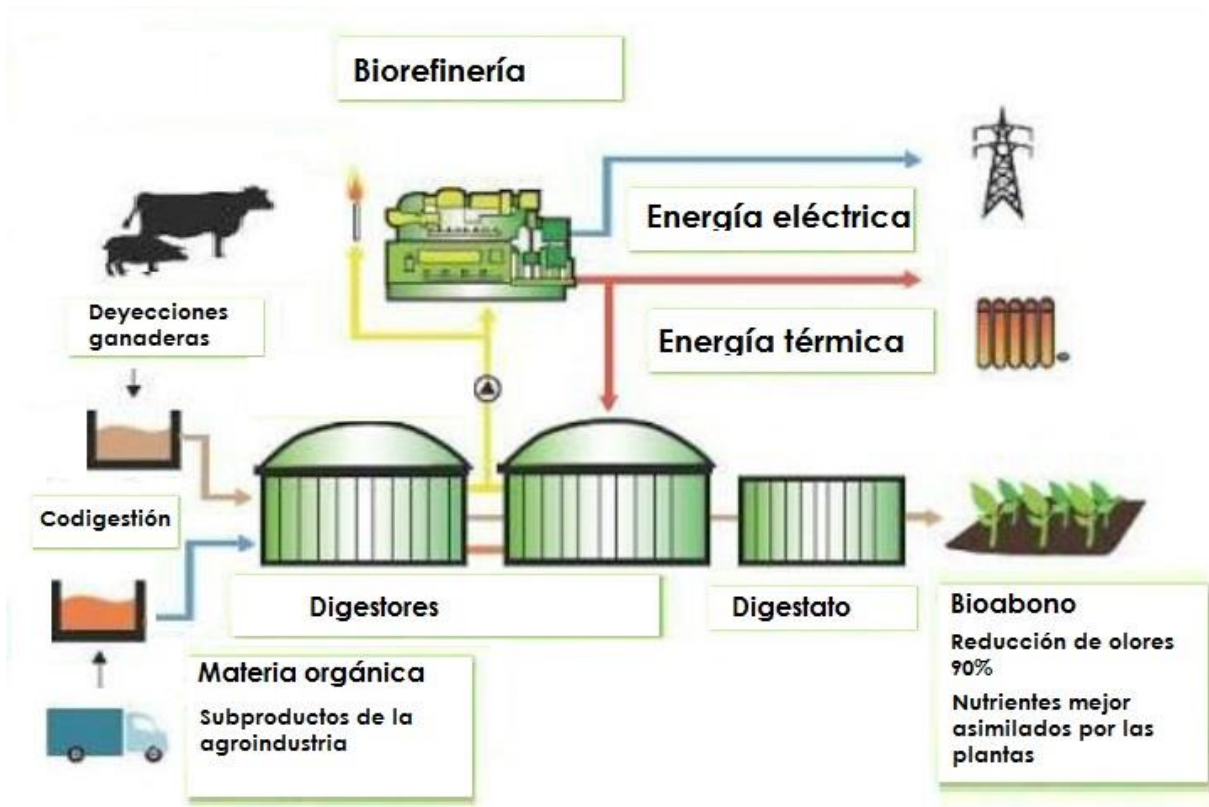


Figura 1 Proceso integral para producción y usos del biogás.

2.5.4 Biodigestores utilizados para la digestión anaerobia.

Los digestores anaeróbicos no son una nueva tecnología, fueron usados a escala de granja por muchos años en países en desarrollo. Sin embargo se han hecho mejoras en los digestores para que sean más compactos, de costo reducido y que sean más fáciles de manejar. Algunos progresos se han realizado, pero a la fecha no hay un tamaño óptimo de digestor que se ajuste a todos los establos lecheros. Cada situación es única, y un análisis de diseño debe ser llevado a cabo antes de decidir su construcción (Funk, 2007).

Dentro de la variedad de procesos existentes en las tecnologías anaerobias la producción de biogás depende de la materia introducida al sistema, parámetros y tipo de biodigestor empleado. De ahí la importancia de seleccionar el biodigestor adecuado en el sistema de codigestión anaerobia.

Los biodigestores de codigestantes completa o CSTR, constituyen el diseño más habitual cuando se tratan residuos de más de 3% de sólidos. Empleándose principalmente en el tratamiento de residuos sólidos y líquidos de procedencia ganadera, industrial y urbana (Campos et al. 2012). La carga al reactor puede hacerse de forma continua o discontinua.

La mayoría de los sistemas comerciales que actualmente están operando son de flujo pistón convencionales, flujo pistón verticalmente mezclado, reactores de mezcla completa y lagunas cubiertas que operan a temperatura ambiente. El método de digestión tipo laguna produce biogás de desechos diluidos tal como el efluente de la sala de ordeña y es muy comúnmente utilizado por ser de los más económicos. Aunque la mayoría de los sistemas están utilizando solo estiércol del ganado, existen nuevas tecnologías emergentes que incluyen la introducción de desechos orgánicos de alta fuerza para incrementar la producción de gas por unidad de volumen de reactor (EPA, 2006).

El reactor de flujo pistón es la más sencilla de todas las tecnologías anaerobias por lo que su coste es notablemente bajo. Su configuración alargada impide que la carga líquida inicial y el efluente se mezclen (IDEA 2007). La degradación de los residuos transcurre a medida que transitan a lo largo del digestor.

2.6 Diferentes sustratos que producen biogás

El biogás puede ser producido a partir de residuos como: desechos sólidos de frutas y verduras, estiércol de animales, aguas residuales y lodos agroalimentario e incluso los residuos sólidos municipales. Todos los residuos anteriores se convierten en la biomasa potencial y que en forma de sustrato puede ser utilizada en el sistema de generación de biogás.

Los sustratos de interés estudiados en este trabajo fueron suero de leche que se produce como desecho de la mayoría de las industrias queseras y debido a su alto contenido de lactosa y diversas proteínas se considera una buena fuente de carbono y nitrógeno [10/11] y estiércol de diferentes agroindustrias como el de vaca, cerdo, y gallinaza, y grasa como residuo de producción. El estiércol bovino es el mayor desecho producido en los agros sistemas, un uso inapropiado puede crear problemas tales como olor, producción de nitratos y otros elementos contaminantes de cuerpos de agua. Los residuos ganaderos son muy heterogéneos y están

formados por las deyecciones sólidas, líquidas y restos de alimentos. También fue motivo de interés el utilizar un residuo que se determinó como Grasa residual municipal, ya que los residuos urbanos e industriales suelen contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable (lípidos, carbohidratos y proteínas), por lo que presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos, de 30 a 500 m³/t (Ahring et al., 1992; Angelidaki y Ahring, 1997a; Bardiya et al., 1996)

El uso de los sustratos en codigestión representa una alternativa para mejorar el rendimiento de los residuos en la generación de biogás.

2.7 Codigestión de sustratos

El contenido de sólidos y el balance de nutrientes pueden ser mejorados a través de la codigestión de los lodos con otras sustancias orgánicas tales como la fracción orgánica de residuos sólidos municipales, residuos de alimentos, residuos agrícolas y cultivos energéticos (Rao PV 2011). El proceso de codigestión consiste en la digestión anaeróbica simultánea de múltiples residuos orgánicos, con características complementarias (Kim, 2015; Cesareo, 2012). Algunos de los beneficios del proceso de codigestión son los siguientes: aumento de la producción de biogás, dilución de compuestos potencialmente tóxicos, mejoramiento del equilibrio de nutrientes, efecto sinérgico de los microorganismos, incremento de la carga de materia orgánica biodegradable, niveles más favorables de humedad, de alcalinidad y de la relación carbono/nitrógeno en el alimento del digestor, además de compartir los costos de tratamiento de diferentes flujos de residuos en una sola instalación (Gómez, 2017; Bond, 2012; Lin, 2011).

La codigestión anaeróbica de los lodos de aguas residuales con la fracción orgánica de residuos sólidos, puede ser una de las soluciones más viables para optimizar la eficiencia de los digestores en las plantas de tratamiento de agua residual, los cuales tienen una capacidad libre típica que puede ser aprovechada adicionando la cantidad apropiada de la fracción orgánica de residuos sólidos orgánicos (Cabbai V. 2013). Dentro de la fracción orgánica de residuos sólidos, los residuos de alimentos constituyen un sustrato atractivo para codigerir con los lodos en los digestores, teniendo en cuenta su alto contenido de nutrientes, rápida biodegradabilidad y su disponibilidad en grandes cantidades; por otro lado, el uso de los residuos de alimentos en la co-

digestión permitiría evitar su disposición en los rellenos sanitarios, impidiendo la contaminación de las aguas subterráneas, el tratamiento de lixiviados y reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero (Nathan DP. 2012) Sin embargo, existen algunas limitaciones que deben ser controladas en la implementación de la codigestión

Los residuos de alimentos son ricos en carbohidratos, proteínas y grasas, suelen tener una alta proporción de materia orgánica biodegradable y una alta relación C/N, lo que representa un problema al ser digeridos anaerobiamente por presentar ausencia de los micronutrientes necesarios para el desarrollo de las bacterias, como consecuencia podrían presentar problemas de acidificación e inhibición, de ahí que la codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de codigestantes completa sea una metodología exitosa y su principal ventaja sea aprovechar la sinergia de las codigestantes y compensar carencias de cada uno de los sustratos por separado. En la Tabla 4 se presentan algunos sustratos y su rendimiento reportado en biogás, donde se observa que en codigestión, residuos orgánicos con estiércol de vaca tiene mejores rendimientos en m³ de biogás/Kg sólidos volátil.

Tabla 4 Algunos residuos sólidos y semisólidos utilizados para la codigestión anaerobia y rendimientos reportados en literatura.

Sustrato	Biogás m³/kg SVT	Autores
Residuos orgánicos industriales (RO), excreta de vaca (EV), residuos de matadero (R), residuos de frutas y verdura (FV)	RO / EC 0.5 RO/EC/R 0.6 RO/EV/ 0.7	Murto et al. 2004.
Excreta de pollo (EP), vaca (EV) y cerdo (EC)	EP / EC 0.13	Fanzonni 2009
Excreta de pollo (EP), vaca (EV), cerdo (EC) y residuos de pasto (RP)	EC /RP 0.37 EV / RP 0.028 EP / RP 0.002	Ahn, et al., 2010
Excreta de vaca(EV), residuos de comida (RC), lodos anaerobios (LA) como inóculo	EV /RC/LA 0.051	Li et al., 2011
Excreta de vaca (EV), residuos de jardín (RJ), jugo de frutas (JF) y lodos anaerobios (LA) como inóculo	EV/LA/RJ 0.027 EV/LA/JF 0.026	Venkates 2011

En general todos los tipos de biomasa pueden ser sustratos (desechos de animales, desechos de agricultura, residuos domésticos, lodos de aguas residuales, agua residual y material de relleno sanitario) mientras contengan carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa como componente principal. (Romero, 1997)

Las excretas de humanos y de animales son ricas en nitrógeno, con una relación C/N inferior a 25/1, durante la degradación tiene una mejor velocidad de biodegradación y generación de gas, en cambio los residuos agrícolas son ricos en carbono con una relación C/N superior a 30/1 pero con una generación más lenta de gas.

En general los sustratos ricos en carbono producen más gas que los ricos en nitrógeno, así mismo es más rápida la producción de gas a partir de los sustratos nitrogenados como las excretas, que los ricos en carbono como pajas. (FAO, 1986 a,b)

Por ello para conseguir un buen rendimiento de biogás en forma constante durante la fermentación, es conveniente combinar proporciones adecuadas de sustratos ricos en nitrógeno con los de alta relación C/N.

2.8 Inóculo microbiano

En la depuración de aguas residuales mediante procesos anaeróbicos, se lleva a cabo la retención de biomasa en forma de gránulos (lodos anaeróbicos), sujetos al tipo de sustrato desarrollan consorcios microbianos de bacterias anaeróbicas adaptadas para la degradación de materia orgánica en pasos consecutivos en donde un microorganismo depende de otro.

Incluir estos lodos anaeróbicos es la manera más factible de inocular los biodigestores para que se lleve a cabo la digestión. Entonces se asume que el sustrato y los nutrientes estarán presentes en exceso, por lo que la concentración inicial de lodo es un factor importante para la duración del ensayo. (Chernicharo, 2007).

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el sector agropecuario de México, la ganadería porcícola y bovina juega un papel importante en la generación de excretas. La acumulación, el manejo inadecuado y la incorrecta disposición final de estos desechos ganaderos han provocado serios problemas ambientales relacionados con la contaminación del agua, suelo y aire.

Una medida mitigante para la disposición de estos residuos, es su utilización como biomasa para generar energías alternativas como es el caso del biogás. Por lo que es necesario seleccionar los sistemas de producción de biogás, de acuerdo a las características específicas del entorno, aprovechando distintos tipos de residuos en codigestión que puede complementar el potencial de producción de biogás de los mismos por separado y maximizarlo.

4 JUSTIFICACIÓN

Usualmente los residuos sólidos son considerados negativos y periféricos a las actividades de sus generadores y no como una posible fuente de ingresos; por lo general se deshacen de ellos mediante su dispersión o vertimiento en tiraderos. La generación nacional de residuos sólidos municipales (RSM), se calcula en alrededor de 85,000 ton/día, de las cuales el 52 % es materia orgánica. Por otra parte la gran cantidad de estiércol producido por el ganado no tiene un tratamiento previo o adecuado para su disposición final, lo cual implica mantener un foco de infección latente perjudicial para la comunidad en general ya que gran cantidad de estiércol se deposita en las tierras de cultivo, si bien sirve para mejorar su calidad, así como para obtener mejores cosechas, también tiene un inconveniente, el estiércol tarda aproximadamente un año en degradarse y poder ofrecer todos sus nutrientes de manera asimilable (Herrick y Lai, 1996; Aarons *et al.*, 2004; Vadas *et al.*, 2011). Otra desventaja es que al descomponerse en presencia del aire la reacción que se presenta es exotérmica a través de una fermentación, el calor producido eleva la temperatura a su alrededor.

El aprovechar distintos tipos de residuos y mezclarlos, puede complementar el potencial de producción de biogás de los mismos por separado y maximizarlo. La biomasa tiene que ser seleccionada en términos de altos contenidos de energía y potencial de producción de biogás. Esta consideración ayudará a incrementar la producción de biogás y a sobreponer los altos costos de producción de una manera sustentable mediante la introducción del concepto de plantas de biogás centralizadas como biorefinerías. Las ventajas son el generar energías renovables a partir de residuos orgánicos y reducir el uso de fertilizantes artificiales, todas estas ventajas hacen a las biorefinerías ser económicamente viables y capaces de combinar varios beneficios ambientales a través de diferentes sectores.

Además, el aprovechamiento de los residuos de distintas agroindustrias bajo el concepto de plantas centralizadas beneficiaría a las industrias participantes para tener reducciones en costos y en energía lo que se traduce a mayor inversión en la zona. Las plantas de biogás centralizadas son consideradas para la producción integrada de energías renovables, ya que resuelven una serie de problemas en el campo de la agricultura (utilización de estiércol), energía y medio ambiente.

5 HIPÓTESIS

El proceso de codigestión anaerobia de residuos de distinta naturaleza da como resultado una mayor actividad metanogénica y por lo tanto un incremento en el volumen y concentración de biogás, al combinar residuos y balancear sus características fisicoquímicas.

6 OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Estudiar la codigestión de residuos sólidos y semisólidos agroindustriales de distinta naturaleza orgánica, para la producción de biogás de calidad combustible, utilizando un reactor horizontal.

6.2 Objetivos específicos

- Analizar los residuos para determinar sus características y las proporciones de mezcla para su codigestión, y obtención de la actividad metanogénica, por la norma de Determinación de biogás y el potencial de producción de metano basado en VDI 4630 a través de pruebas de fermentación.
- Determinar el rendimiento de producción de biogás a partir de residuos, en L/KgSV de residuos.
- Encontrar las mejores condiciones de operación del biodigestor para obtener el mayor volumen y porcentaje de metano, considerando el uso de biogás como combustible.

7 METODOLOGÍA

En el siguiente diagrama de flujo, se presentan las actividades que se realizaron durante la ejecución del presente estudio (Figura 2).

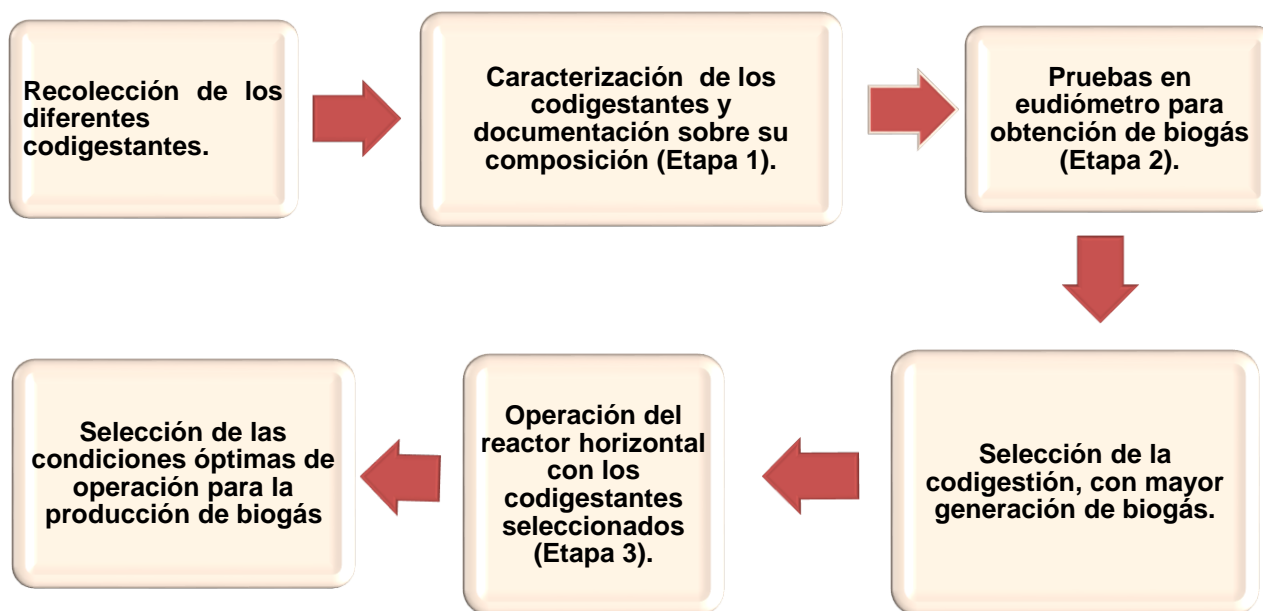


Figura 2 Metodología experimental

7.1 Equipo utilizado

7.1.1 Eudiómetros

Para la medición de biogás de los codigestantes se realizaron pruebas en eudiómetros de la marca SELUTEC (Figura 3). El Eudiómetro es un manómetro que mide el cambio de volumen en el gas a una presión y temperatura constante por desplazamiento de una solución

barrera por el biogás. Consta de 6 fermentadores con sistema de captación y de medición en cada uno. (Anexo 5)

El equipo cuenta con un baño de temperatura y un agitador magnético programable, con lo que se obtendrán condiciones de temperatura y agitación constantes para el estudio. La solución barrera usada en este equipo fue NaCl / ácido cítrico propuesta por Muller y col. (2004).

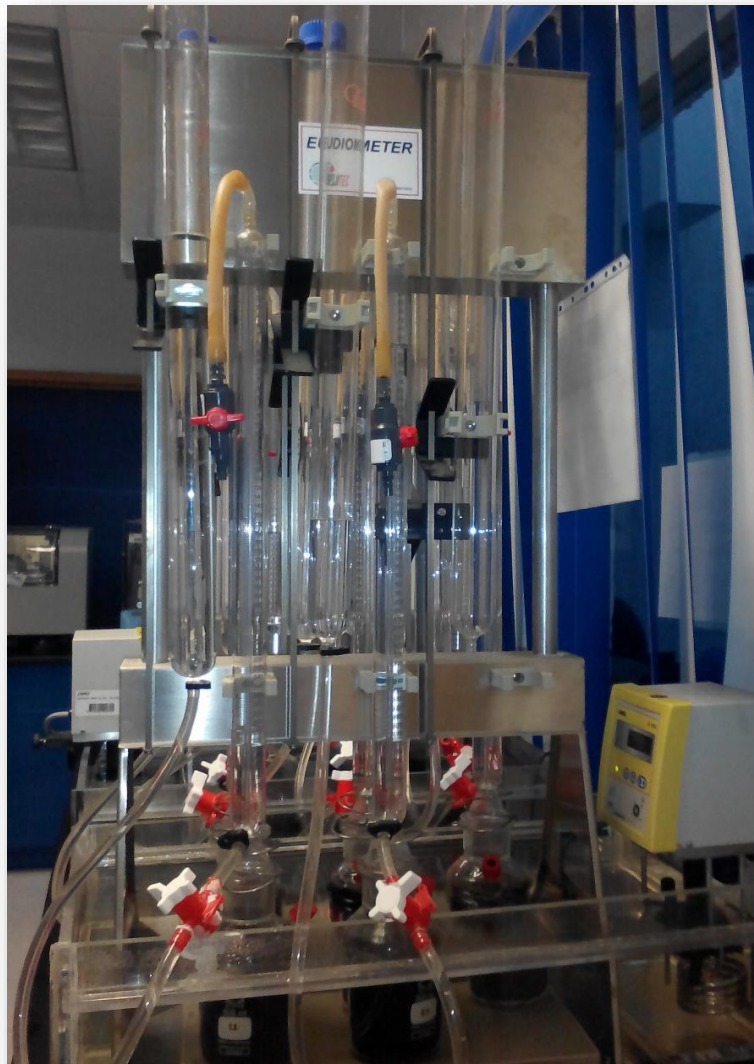


Figura 3 Eudiómetro SELUTEC

En la Figura 4 se muestra el esquema de un fermentador con sistema de medición y captación de biogas por separado.

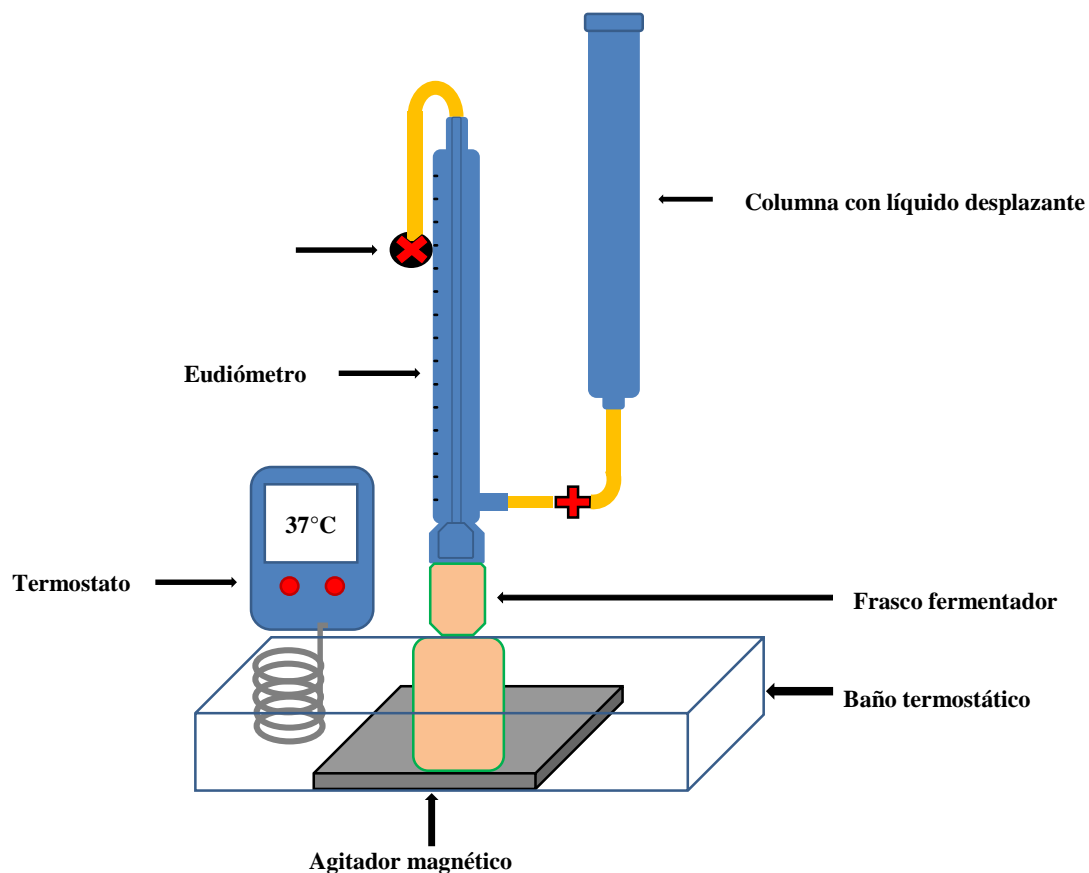


Figura 4 Esquema del eudiómetro SELUTEC.

7.1.2 Reactor horizontal

Se utilizó un biodigestor horizontal piloto con agitación y volumen de 30 L, que se muestra en la **Figura 5**. El biodigestor cuenta con control de temperatura programable y agitación mecánica.



Figura 5 Reactor piloto horizontal con agitación.

7.1.3 Medidor de gas portátil

Para las mediciones del biogás en porcentajes de Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2) y Oxígeno (O_2) se utilizó un medidor de gas portátil de la marca LANDTEC modelo GEM™2000. Se muestra en la **Figura 6**.



- a) Entrada de la muestra
- b) Carga de batería
- c) Pantalla
- d) Panel de control

Figura 6 Medidor de gas portátil

7.2 Recolección de los sustratos

Los residuos de estiércol y suero de leche fueron obtenidos de diferentes granjas de la región ubicadas en Ezequiel Montes y Pedro Escobedo (**Anexo 1**). Una empresa agroindustrial ubicada en Ezequiel Montes suministró residuos orgánicos (grasa residual del proceso de elaboración de croquetas para animales). La biomasa (codigestantes) fue seleccionada en términos de altos contenidos de energía y potencial de producción de biogás, que anteriormente han sido reportados en la literatura. Se llevó a cabo su recolección utilizando equipo de seguridad básico: bata, overol, guantes de látex y de plástico, cubre bocas y zapatos de seguridad. Las muestras fueron tomadas y preservadas en frascos de plástico estériles, durante el transporte se conservó a temperatura ambiente y en el laboratorio se mantuvieron en refrigeración a una temperatura de refrigeración de 4°C.

El inóculo microbiano utilizado fue el lodo anaeróbico de una planta tratamiento de aguas residuales de la empresa Pilgrim's Pride, productora de pollo de la región.

7.3 Caracterización de los sustratos

El propósito de la caracterización de la biomasa fue estimar la cantidad de energía renovable que se puede producir en términos de producción de biogás por unidad de biomasa y productividad de metano en términos de sólidos volátiles. Por lo tanto es de suma importancia conocer las condiciones previas a la digestión, presentes en cada sustrato. Algunos factores importantes a determinar fueron pH, contenido de sólidos volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO), relación carbono nitrógeno (C/N) y nitrógeno amoniacal. Los sustratos fueron preparados en recipientes plásticos, se homogenizaron en agua desionizada a pH 7 con un procesador para alimentos. (**Anexo 2**)

- El pH se midió con el equipo potenciostato Autolab previamente calibrado (Anexo 1), para homogenizar los residuos y tener un mejor manejo de los mismos, fue necesario adicionar agua destilada en proporciones de 1:1 a todos los sustratos.

- Los pesajes de los cosustratos para la preparación de las muestras se realizó con la balanza analítica de precisión Ohaus Pioner 0-210g.
- El contenido de sólidos totales y volátiles se determinó de acuerdo al procedimiento establecido en la norma NMX-AA-034-SCFI-2001.
- Para determinar DQO se utilizó el método: COD viales de digestión de alto rango: 20 - 1500 mg/L COD (Método Hach 8000), realizando la lectura de los viales en el espectrofotómetro UV-VIS DR 6000 marca HACH, programa 435 DQO RA 0-1500 mg/L. (Anexo 4)
- La relación C/N en el sustrato fue establecida de manera teórica consultando diferentes bibliografías.
- Para la caracterización del nitrógeno amoniacal se usó el método de Nitrógeno amoniacal Reagent Set, TNT, AmVer (Salicylate), alto rango: 0.4 - 50.0 mg/L NH₃, método 10031. Lectura en el Espectrofotómetro UV-VIS DR 6000 marca HACH, programa 343. (Anexo 4)

7.4 Pruebas en eudiómetro

El montaje de los eudiómetros se realizó de acuerdo a la Norma Alemana DIN “Determinación de biogás y el potencial de producción de metano basado en VDI 4630 en pruebas de fermentación”. Este método sirve para realizar pruebas de fermentación (PF) y determinar la producción de biogás y metano de los materiales utilizados en plantas anaerobias. **(Anexo 11)**

Para llevar a cabo la etapa de experimentación en eudiómetros, se utilizó un equipo a nivel laboratorio para digestión anaerobia denominado eudiómetro (**Figura 1**). Dentro de cada fermentador se colocaron el inóculo (200g) más la cantidad de sustrato calculada para cada uno. (Anexo 6) Luego el frasco es sellado perfectamente para evitar cualquier salida o entrada de aire, de tal manera que el gas que se produzca en la actividad metanogénica, suba por el tubo interior del eudiómetro, que ha sido previamente llenado hasta un nivel conocido (n1) con la sustancia desplazante (NaOH mas ac. Cítrico), que tiene la función de secuestrante de CO₂ y al mismo tiempo por medio de su desplazamiento por el gas, es posible determinar el biogás obtenido observando el nivel 2 (n2). El líquido desplazado regresa a la columna para su almacenamiento. La medición del gas se lleva a cabo desde el punto superior del eudiómetro,

que cuenta con una manguera y en el extremo una válvula a la cual se le conecta el medidor de gas portátil marca LANDTEC modelo GEMTM2000.

7.4.1 Cálculo de la cantidad (g) de sustrato para cada prueba

Para hacer el cálculo de la cantidad exacta de codigestantes cosustrato-inoculo en el fermentador, primero se calcula la cantidad de cosustrato a agregar por cada fermentador. Este cálculo se hizo de acuerdo al método Alemán, en base a la norma VID 4630, para la determinación de biogás y el potencial de producción de metano en pruebas de fermentación.

Esta operación se realiza de acuerdo a la ecuación del cálculo de sustrato presentada en la Ecuación 1:

Ecuación 1. Cálculo del sustrato.

$$pi = \frac{mi * SVi}{ms * SVs} \quad \text{Para } pi = 2 \text{ y } mi = 400g \quad ms = \frac{mi * SVi}{pi * SVs} \quad (Ec 1)$$

Donde pi es la relación en masa (adimensional), ms es la cantidad de sustrato en gramos, mi es cantidad de inóculo en gramos, SVi está representado la concentración de inóculo la cual es medida en porcentaje masa fresca y SV representa la concentración del sustrato dada en porcentaje de masa fresca.

De acuerdo a la norma VID 4630, el inoculo no debe exceder ciertas cantidades de solido volátil (SV) así como los siguientes requerimientos especiales;

- SVi inóculo=1.5% a 3%
- A partir de esta relación y tomando como base 400 g de inóculo, (debido a que cada fermentador tiene una capacidad máxima de 500 g) se puede calcular la cantidad de sustrato que se requiere.

Las mediciones de producción de biogás se realizaron de manera continua para evitar que existiera una sobrepresión en los fermentadores y disminuir la probabilidad de fugas de biogás. Las mediciones de biogás (contenido de CH₄ y CO₂) se hicieron diariamente, cuando la producción de biogás fue menor a 80 ml, entonces se dejó acumular el biogás hasta lograr un volumen desplazado mayor. Para realizar las mediciones se conectó el analizador de biogás portátil de la marca LANDTEC, modelo GEM 2000 el cual nos permite medir el porcentaje de CO₂, CH₄ y O₂ en el biogás.

Se realizó la preparación del inóculo manteniéndolo a temperatura de 37°C y agitación constante durante 24 horas previas al inicio del experimento. Se pesaron 400g del inóculo por cada frasco fermentador, y se agregó la cantidad de sustrato calculada para cada uno. Los frascos se sellaron perfectamente y se programó la agitación a 600rpm y el baño termostático se mantuvo en condiciones mesofílicas a 37°C.

7.4.2 Mediciones del biogás

Las mediciones de producción de biogás se realizaron diariamente para evitar que existiera una sobrepresión en los fermentadores y disminuir la probabilidad de fugas de biogás. La medición se realizó con un equipo medidor de biogás portátil marca LANDTEC. Se llevó registro en la bitácora diariamente de la hora de la medición del volumen, la presión atmosférica y la temperatura ambiente. Este proceso aplicó de la misma manera para los tres experimentos realizados.

La digestión de cada una de las pruebas tuvo un tiempo de retención de 27 días. Las mediciones de biogás se terminaron al cumplir con las siguientes condiciones incluidas en el método:

- a) Al menos 25 días de fermentación
- b) Durante tres días seguidos la cantidad de gas disminuyó periódicamente en un 0.5%.

7.4.3 Cálculos para la producción diaria de biogás en los eudiómetros

Para el volumen diario se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 2 Producción diaria de biogás

$$V = \pi * r^2 h \quad (Ec. 2)$$

V= Volumen de gas

d= diámetro interno del cilindro (1,391cm)

h=producción de biogás en mm.

La normalización del gas se hizo bajo las siguientes condiciones: gas seco a 273.15 K y 1013.25 mbar. Lo cual se observa en la ecuación 3:

Ecuación 3 Normalización del gas

$$F = \frac{(p - p_{H_2O}) * T_o}{(t + 273.15) * p_o} \quad (Ec. 3)$$

$T_o = 273,15 \text{ K}$ (Temperatura estándar)

$t =$ Temperatura del gas °C

$p_o = 1013,25 \text{ mbar}$ (Presión estándar)

$p =$ Presión del aire (presión registrada diario en mbar)

La presión de vapor del agua en función de la temperatura se representó por la siguiente función en un rango de temperatura de 15-30°C (R2=99,997%):

Ecuación 4 Presión de vapor del agua

$$p_{H_2O} = y_0 + a * e^{b*t} \quad (Ec. 4)$$

$$y_0 = -4,39605$$

$$a = 9,762$$

$$b = 0,0521$$

De la Ec. 3 y el volumen diario de biogás, se calculó el volumen de biogás normalizado:

Ecuación 5 Cálculo del Volumen diario de biogás

$$V_{OP} = V_p * F \quad (Ec. 5)$$

V_{OP} =Volumen de biogás normalizado en (Nml)

V_p =Volumen diario de biogás (ml)

7.4.4 Volumen de biogás generado en cm³ diariamente

Uno de los principales criterios de selección para los mejores cosustratos, es la producción de gas en las mezclas de codigestantes fueron medidas según la acumulación de biogás durante los 27 días de digestión, en la gráfica 5 se muestra el volumen generado diario para cada una.

7.4.5 Suma de volúmenes de gas específicos

Se obtuvo la sumatoria de las producciones de biogás específicas, corrigiendo con el estándar. El cálculo se hizo en función de los Sólidos Volátiles (SV).

Ecuación 6 Suma de volúmenes de gas específicos

$$V_{T_s} = \left(\sum_{i=1}^n V_{OP_i} - \frac{m_p}{m_B} * \sum_{i=1}^n V_{OB_i} \right) * V_s^{-1} \quad (Ec. 6)$$

V_{T_s} = producción específica de biogás en $\frac{Nml}{Kg_{V_s}}$ acumulada hasta el día n

V_{OP_i} = producción de biogás en el día i en Nml

m_p = masa del inóculo en el fermentador con prueba

m_B = masa del inóculo en el fermentador del estándar

V_{OB_i} = producción de biogás del estándar en el día i Nml

V_s = pesada dek SV en kg

$$V_T = \left(\sum_{i=1}^n V_{OP_i} - \sum_{i=1}^n V_{OB_i} \right) * V_s^{-1} \quad (Ec. 6.1)$$

V_T = producción de biogás en L/Kg_{V_s} hasta el día n

Desglosando la fórmula:

De la cantidad de biogás normalizada se restó la cantidad del gas del inóculo estándar

$$V_{R_i} = V_{OP_i} - V_{OB_i} \quad (Ec. 6.2)$$

V_{R_i} = producción de biogás real en el día i Nml

La producción de biogás en NLitros/kg Masa Fresca (FM) se calculó:

Ecuación 7 Cálculo de la producción de biogás en N Litros/kg Masa Fresca

$$V_T = \sum \frac{V_{Ri}}{m_s} \quad (Ec. 7)$$

$V_T =$ producción total de biogás en Nml/g_{MF}

$m_s =$ masa del la prueba en el fermentador g

La producción de biogás Nml/g SV

$$V_T = \sum \frac{V_{Ri}}{m_s * \%S_V(FM)} \quad (Ec. 7.1)$$

$V_T =$ producción total de biogás en Nml/g_{MF}

$\%S_V(FM) =$ porcentaje de solidos volátiles de material fresco

7.4.6 Producción de metano

El cálculo de la producción de metano se basa en la cantidad de gas normalizada y la correspondiente concentración de CH₄. Para esto se llevó a cabo una estandarización en las mediciones de concentración de CH₄ y del CO₂. La estandarización consistió en corregir la concentración de CH₄, porque la medición incluye un residual de agua de vapor, que hay que eliminar en el cálculo. La corrección también tomó en cuenta el espacio vacío donde se almacena gas en el fermentador considerando el volumen total, ya que al principio se inyecta gas inerte en el volumen del gas.

Ecuación 8 Cálculo de la cantidad de metano en la prueba en NL

$$CH_{4p} = V_{OP} * \frac{C_{PCH_4}}{C_{PCH_4} + C_{PCO_2}} \quad (Ec. 8)$$

$CH_{4p} =$ Cantidad de metano en la prueba en NL

V_{OP} = Cantidad de gas en prueba en NL

C_{PCH_4} = Medición de la concentración de CH_4 en el biogás de la prueba en %

C_{PCO_2} = Medición de la concentración de CO_2 en el biogás de la prueba en %

Para el estándar

Ecuación 9 Cálculo de la cantidad de metano en el inóculo en NL

$$CH_{4B} = V_{OB} * \frac{C_{BCH_4}}{C_{BCH_4} + C_{BCO_2}} \quad (Ec. 9)$$

CH_{4B} = Cantidad de metano en el inóculo en NL

V_{OB} = Cantidad de gas en el inóculo en NL

C_{BCH_4} = Medición de la concentración de CH_4 en el biogás en el inóculo en %

C_{BCO_2} = Medición de la concentración de CO_2 en el biogás en el inóculo en %

7.4.7 Suma de la producción de metano específica y total

Ecuación 10 Producción específica de metano

$$CH_{4Ts} = \left(\sum_{i=1}^n CH_{4Pi} - \frac{m_p}{m_B} * \sum_{i=1}^n CH_{4Bi} \right) * V_s^{-1} \quad (Ec. 10)$$

CH_{4Ts} = producción específica de metano en $\frac{Nml}{Kg_{V_s}}$ acumulada hasta el día n

CH_{4Pi} = producción de metano en el día i en Nml

m_p = masa del inóculo en el fermentador con prueba

m_B = masa del inóculo en el fermentador del estándar

CH_{4B_i} = producción de biogás del estándar en el día i Nml

V_s = pesada del SV en kg

i = días durante el experimento

$$CH_{4T} = \left(\sum_{i=1}^n CH_{4P_i} - \sum_{i=1}^n CH_{4B_i} \right) * V_s^{-1} \quad (\text{Ec. 10.1})$$

CH_{4T} = producción de biogás en L/Kg V_s hasta el día n

7.5 Selección de los sustratos en codigestión, con mayor generación de biogás.

En la primera etapa de experimentación se llevaron a cabo 3 pruebas en eudiómetros, se definieron como Experimentos 1, 2 y 3. En el experimento 1 se realizó la combinación de sustratos en codigestión, partiendo de los 5 codigestantes obtenidos en los muestreos: Estiércol de vaca (EV), Grasa residual municipal (GRM), Estiércol de puerco (EP), Pollinaza (PO), Suero de leche (SL), y un inoculo (lodos anaerobios de una planta tratadora de agua). Cada mezcla de cosustratos se proporcionó con la condición de mantener un pH cercano a la neutralidad, compensando a un codigestante ácido con otro de mayor pH. Otra condición para mezclar los codigestantes fue equilibrar su contenido de C/N y de esta manera favorecer la conversión de la materia orgánica en energía. Cada mezcla se colocó por separado en un fermentador con un eudiómetro. Desde el día uno hasta el final de la digestión se realizaron mediciones de la producción de biogás, representada en porcentajes de: Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂) y Oxígeno (O₂). Realizada la sumatoria del biogás producido por cada mezcla en el fermentador, se definió al mejor codigestante del Experimento 1. Partiendo de este resultado para el Experimento 2 se repitió la fermentación de las 3 mezclas de codigestante con mayor producción de biogás y mayor % de metano. Y para el Experimento tres, nuevamente se tomó

el codigestante que presentara una producción de metano mayor al 70% durante la digestión. El cosustrato cuya producción de biogás presentó la mejor producción de biogás, fue seleccionado para llevar a cabo su escalamiento en el reactor horizontal y continuar con la producción de biogás.

7.6 Operación de codigestión de residuos en biodigestor horizontal

Para llevar a cabo la codigestión se utilizó un reactor horizontal piloto de acero inoxidable con volumen total de 30 L, el cual cuenta con control de temperatura programable y de agitación mecánica, al cual se le implementó un sistema de medición de gas por desplazamiento de volumen. (**Figura 7**). Se seleccionó el cosustrato que presentó mejor producción de biogás durante la etapa de experimentación en eudiómetros y se determinó la cantidad y combinaciones para la codigestión que es necesario para obtener la mayor calidad y producción de biogás.

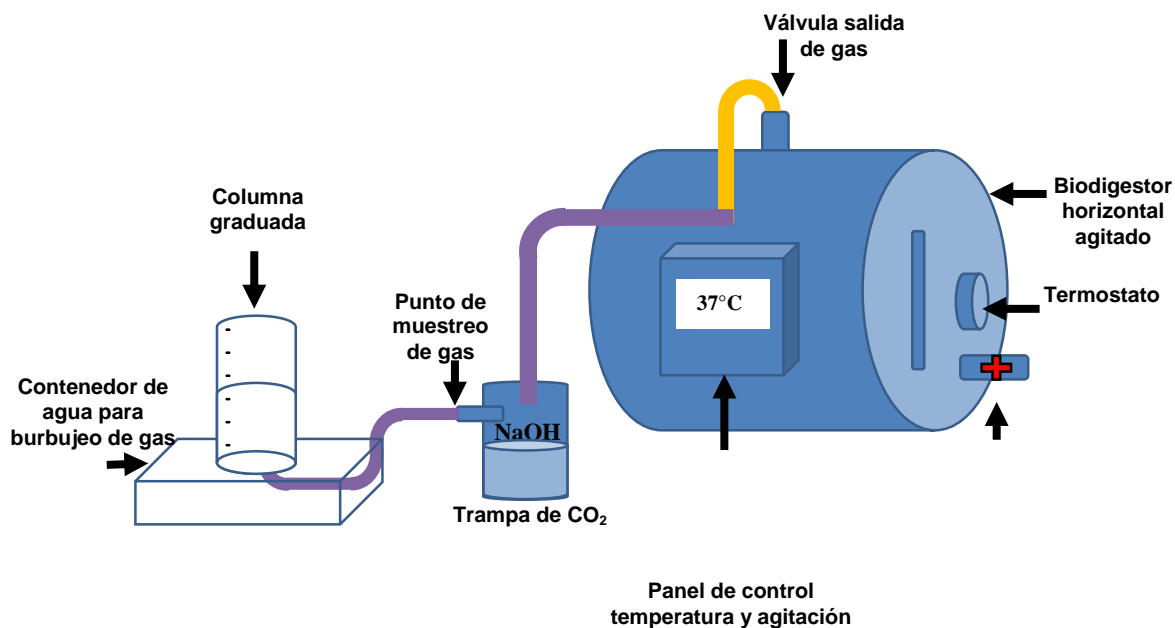


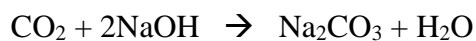
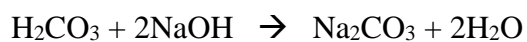
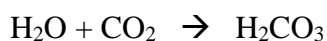
Figura 7 Esquema del biodigestor con sistema de medición de biogás por desplazamiento de volumen.

7.6.1 Producción de biogás

Durante la operación del biodigestor horizontal, se midió la producción de biogás promedio de litros por día, para lo cual se utilizó el método volumétrico que se basa en la cuantificación del

volumen de metano producido mediante el uso de una solución desplazante, como el NaOH o KOH, en un rango de 15 -20 g/L (Field, 1987), para el sistema en este trabajo se utilizó NaOH 20 g/L por su propiedad de reaccionar secuestrando el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido.

Las reacciones que se presentan en la sustancia desplazante de la columna son las siguientes (Chernicharo, 2007):



Obteniendo finalmente Agua (H₂O) con una precipitación de Carbonato de Calcio (Na₂CO₃).

8 RESULTADOS

8.1 Caracterización de codigestantes

En la tabla 5 se muestra la caracterización de los diferentes codigestantes: estiércol de vaca, grasa residual municipal, estiércol de cerdo, pollinaza, suero de leche e inóculo, se realizó a partir de la medición de pH, SV, DQO, C/N (Anexo 3).

Tabla 3 Caracterización inicial de sustratos.

Sustrato	DQO(mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)	pH	SV%	C/N*
Estiércol de vaca	846	500	8.29	10.72	25
Grasa residual municipal	906	850	6.15	16.18	**
Estiércol de puerco	584	140	6.95	8.34	13
Pollinaza	1049	103	7.68	10.77	15
Suero de leche	264	580	4.93	7.66	20
inoculo (lodos anaerobios)	155	440	7.76	2	10

* La relación C/N fue obtenida teóricamente (R. Robalino, 2011) ** Sin datos bibliográficos

Dado a que el interés de este proyecto se enfocó en estudiar la producción de biogás de los cosustratos, se planeó el primer experimento de cosustratos en eudiómetro de la siguiente manera.

Basado en el pH inicial de los sustratos (**Tabla 5**) y buscando el equilibrio entre la codigestión de los sustratos para que al conformarse como cosustratos, se alcanzara un pH cercano a la neutralidad, se realizó la composición de cosustratos como se muestra en la **Tabla 6** Composición inicial de los cosustratos para experimentos en eudiómetros, Exp 1. Una vez caracterizados los sustratos se prepararon para someterlos a codigestión en las pruebas de fermentación en los eudiómetros.

8.2 Composición de los cosustratos para los experimentos en eudiómetros

Como se mencionó anteriormente la cantidad de inoculo es la misma para los codigestantes en cada uno de los fermentadores, el cálculo se realizó de acuerdo a la norma VID 4630, ya que

este solo depende del volumen del fermentador esto se observa en la **Tabla 6**, además se presenta el nombre que fue asignado a cada una de las codigestantes y la composición de cada una de estas. También se observa el cosustrato presentado en gramos, que se agregó en cada fermentador. Uno de los parámetros de mayor relevancia presentado en la **Tabla 6** es %/% debido a que se tiene que encontrar la composición óptima para poder tener un pH cercano a la neutralidad que es de vital importancia para que la digestión anaerobia se lleve a cabo. Y la composición presentada en la tabla 7.3 es la mejor para cada una de las codigestantes.

La adición de agua en el sustrato se definió para obtener porcentajes de Sólidos Volátiles de entre 15% y 20%.

Tabla 4 Composición inicial de los cosustratos, para experimentos en eudiómetros, Exp.1

Experimento 1						
ID	Composición	%	pH	Adición de agua	SV (%)	Cosustrato (g)
Inóculo	Inóculo	100	7.33	no	1.63	200
Estiércol de vaca	Estiércol de vaca	100	7.39	01:01	15.94	20.42
M1	Est vaca/suero de leche	80/20	7.04	01:01	13.50	24.12
M2	Est vaca/grasa	80/20	7.05	01:01	18.55	17.54
M3	Est vaca/pollinaza	60/40	7.06	01:01	18.57	17.53
M4	Est vaca/Est cerdo	50/50	7.66	01:01	17.58	18.52
M5	Est cerdo/grasa	83/17	7.03	01:01	18.42	17.67
M6	Est cerdo/suero	90/10	7.21	01:01	12.26	26.55
M7	Est cerdo/pollinaza	50/50	7.05	01:01	18.66	17.45
M8	Suero de leche/grasa	33/67	7.11	01:01	16.18	20.12
M9	Estiércol de vaca	100	7.39	01:01	15.94	20.42

Basado en los resultados del experimento 1 (**Tabla 6**), se realizó un segundo experimento en eudiómetros, donde se retomaron los mejores codigestantes, que para el caso del experimento 1 fue la codigestión de Estiércol de vaca con grasa en porcentaje 80/20 respectivamente, obteniendo una sumatoria de 41.6 L/Kg SV (Litros por kilogramo de Sólido Volátil) de biogás durante los 27 días de la digestión y un porcentaje máximo de metano (CH₄) de 76%.

Se presenta en la tabla 7 la conformación de los Eudiómetros para el Experimento 2 donde se consiguen composiciones de codigestantes optimizados al mantener el pH dentro de la

neutralidad. Se incluyó el cosustrato M2 (Estiércol de vaca/grasa) que nuevamente presentó la mejor producción de biogás de 72.1 L/Kg SV durante la digestión de 27 días y alcanzando un promedio de 80% de metano (CH₄) en el gas.

Durante el experimento 2 también se observó que la digestión en el control de Estiércol de vaca sin inocular, obtuvo un alta generación de biogás, alcanzando durante el periodo de digestión hasta 200 L/Kg SV, sin embargo el porcentaje de metano presente en el biogás no alcanzó siquiera el 65 %, siendo por lo tanto un biogás de baja calidad

Tabla 5 Composición inicial de los cosustratos, para experimentos en eudiómetros, Exp.2

Experimento 2						
ID	Composición	%	pH	Adición de agua	SV (%)	Cálculo del sustrato (g)
Inóculo	Inóculo	100	7.76	NO	2.03	200
Estiércol de vaca	Estiércol de vaca	100	8.11	01:01	15.58	26
M1	Est vaca/suero de leche	80/20	7.68	01:01	8.24	49.17
M2	Est vaca/grasa	80/20	7.22	01:01	21.46	18.88
M4	Est vaca/Est cerdo	60/40	6.95	01:01	10.31	39.3
M5	Est cerdo/grasa	50/50	6.66	01:01	18.91	21.42

Nuevamente basado en un criterio de estabilidad de pH durante la digestión y de mejor producción de biogás en cuanto a porcentaje de metano mayor al 70%, se retomaron por duplicado 4 de los codigestantes de los dos experimentos anteriores, sin embargo esta ocasión se incluyó un control de grasa, debido a que en los experimentos 1 y 2 demostró mayores rendimientos en codigestión con el estiércol de vaca. Sin embargo la fermentación de la grasa sola, durante la digestión no mostró gran actividad metanogénica, ya que al no estar en presencia de otro codigestante, la producción de metano es muy baja, tan solo de 2 L/Kg SV y 24% de metano (CH₄) en el gas. Mientras que al encontrarse en codigestión con el estiércol de vaca fue nuevamente la mejor producción de biogás con 48.7 L/Kg SV al final de la digestión y 76% de metano, aunque a en este tercer experimento se obtuvieron los mismos rendimientos a partir de la codigestión de la grasa con suero de leche, en el fermentador M3, obteniendo al final de la digestión 58 L/Kg SV y 76% de metano en el biogás.

Los resultados del rendimiento de biogas en L/Kg SV y porcentajes de metano de los tres experimentos se muestran más adelante en las gráficas 7 y 8

Tabla 6 Composición inicial de los cosustratos, para experimentos en eudiómetros, Exp.3

Experimento 3						
ID	Composición	%	pH	Adición de agua	SV (%)	Cálculo del Sustrato (g)
Inóculo	Inoculo	100	7.21	No	1.80	200.0
Inóculo	Inoculo	100	7.21	No	1.49	242.4
Grasa 1	Grasa/inóculo	100	5.8	No	27.85	13.0
Grasa 2	Grasa	100	5.8	No	30.42	11.9
M11	Est vaca/grasa/est cerdo/suero	25/25/25/25	6.76	01:01	10.32	34.9
M12	Est vaca/grasa/est cerdo/suero	25/25/25/25	6.76	01:01	11.25	32.1
M21	Est vaca/grasa	80/20	6.81	01:01	13.30	27.1
M22	Est vaca/grasa	80/20	6.81	01:01	13.33	27.1
M31	Grasa/suero	80/20	6.67	01:01	14.45	25.0
M32	Grasa/suero	80/20	6.67	01:01	14.45	25.0
M41	Est cerdo/est vaca/grasa	33/33/33	6.56	01:01	13.21	27.3
M42	Est cerdo/est vaca/grasa	33/33/33	6.56	01:01	13.21	27.3

De los tres experimentos realizados en los eudiómetros se resume como la mejor composición de cosustratos que fueron M2 (Estiércol de vaca/grasa) y M3 (Grasa/suero de leche) para escalar en la siguiente etapa dentro del digestor horizontal.

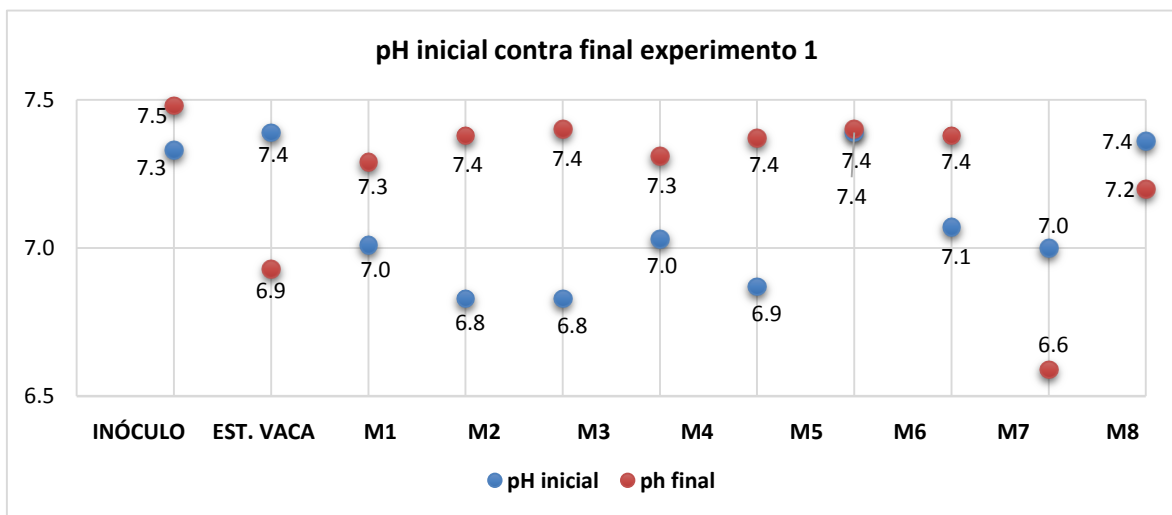
8.3 Resultados de los experimentos en eudiómetros

El tiempo de retención de los experimentos en eudiómetros 1, 2 y 3 fue de 27 días, obteniendo la mayor producción de biogás con el cosustrato M2 Estiércol de vaca/grasa (80/20%), con 41.6 L/Kg SV.(Experimento 1), 72.1 L/Kg SV.(Experimento 2) y 48 L/Kg SV, además de obtener 58.2 L/Kg SV con M3 Grasa7 Suero de leche (Experimento 3). Los resultados de todos los eudiómetros se muestran en las tablas 9-11.

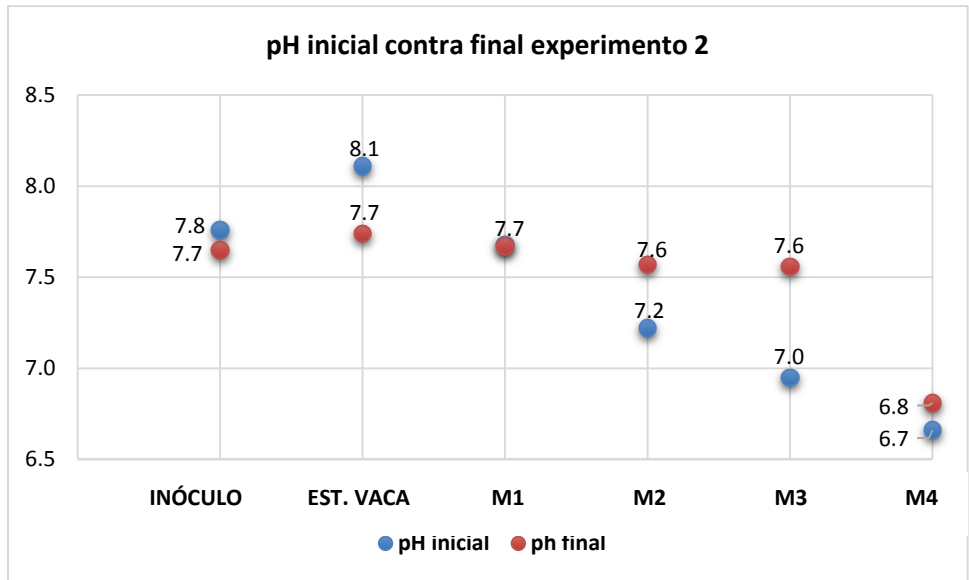
Cabe mencionar que en el experimento 3 se incluyó una prueba de fermentación donde se mezclaron 4 codigestantes que se sometieron a digestión en proporciones iguales y por

duplicado (M11 y M12). Pero como se puede ver en la tabla 11 se obtuvo una producción baja de biogás y de metano en comparación con los anteriores, esto se debe a que la mezcla no resulto favorecida en la interacción de los microorganismos presentes lo cual provoco una inhibición y una ligera acidificación al saturar la fermentación con la carga, ya que el pH de entrada es mayor al pH de la mezcla al fin de la digestión.

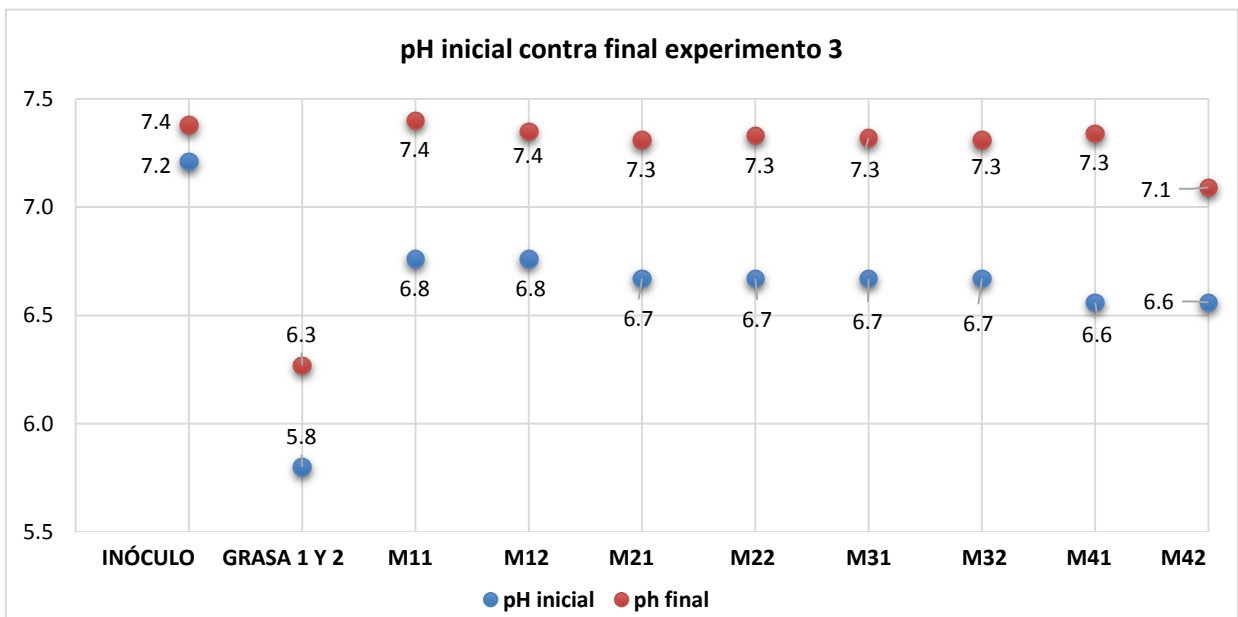
En la gráfica 1 Se muestra una comparación de los parámetros inicial (antes de la digestión) y al final de la digestión, donde esperamos un pH neutro para todos los casos, la tendencia mostrada es que el pH final se ajusta al pH neutro, esto se puede ver en las gráficas 1-3 ya que los valores se encuentran dentro de los limites inferior y superior, la mayoría están cerca de este último lo que nos conviene porque es la principal señal de comprobar que no se presentó una acidificación en la actividad metanogénica, ya que esto implicaría su propia inhibición y por lo tanto el fin de la producción de biogás.



Gráfica 1 Cambio de pH en los cosustratos, antes y después de la digestión, experimento 1



Gráfica 2 Cambio de pH en los cosustratos, antes y después de la digestión, experimento 2.

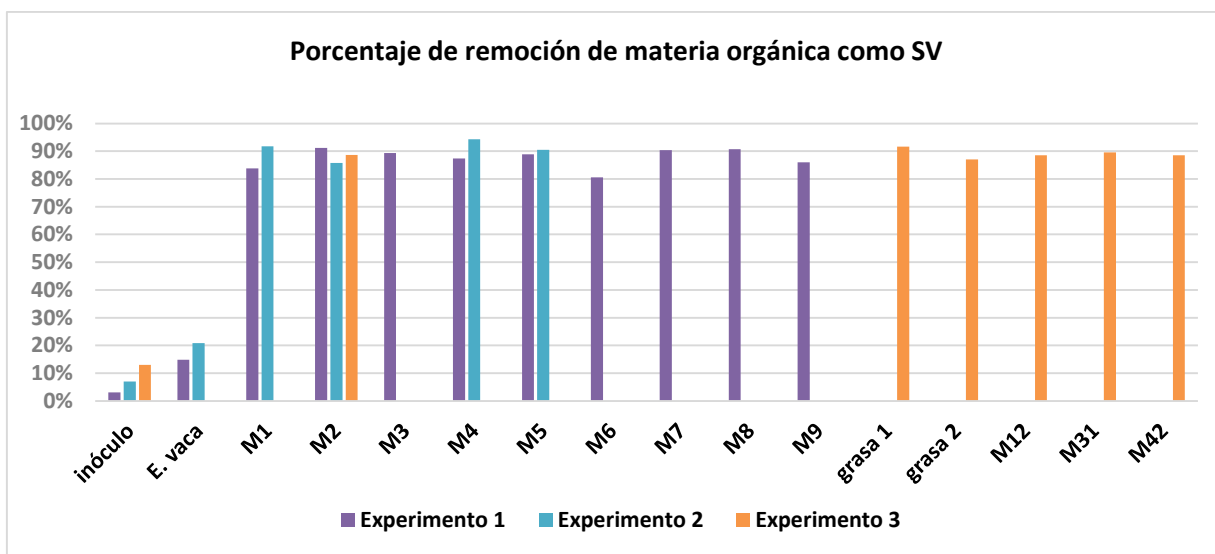


Gráfica 3 Cambio de pH en los cosustratos, antes y después de la digestión, experimento 3.

Con base a los resultados mostrados en las gráficas 1-3 se observó que todos los valores de pH se mantuvieron dentro del óptimo (6.5 y 7.5). El valor de pH de la prueba al final de la fermentación indica que no se presentó acidificación en el medio durante el tiempo de experimentación.

Partiendo del hecho de que toda la materia orgánica, está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST), el porcentaje de sólidos totales contenidos en la codigestantes con que se alimenta el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La destrucción de ST y SV es una indicación de la eficacia del proceso de digestión anaerobia. El contenido en sólidos totales (ST) indica la cantidad de agua disponible en la etapa de hidrolisis. Los sólidos volátiles (SV) indican que una fracción de la materia orgánica es susceptible de ser transformada a biogás durante el proceso (Avendaño 2010).

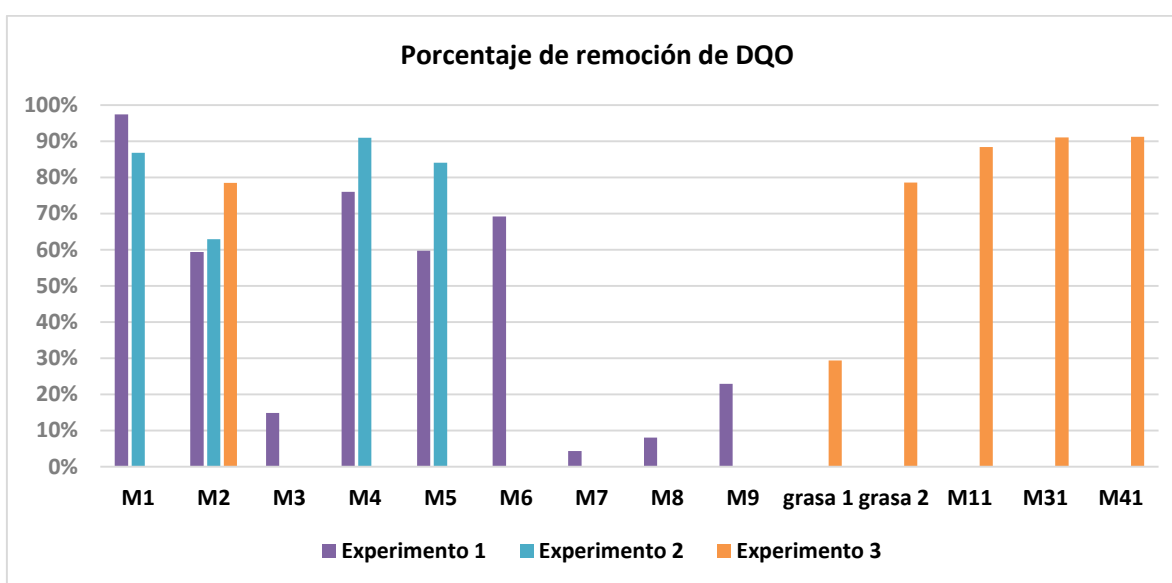
Se recomienda que la carga a degradar se encuentre de 5 a 10%, sobre ésta base se toma en cuenta la cantidad de agua que se debe agregar a los componentes. Se realizó la caracterización a los digestatos para conocer los cambios generados durante la digestión. En contraste se muestran los porcentajes de remoción o de incremento de SV (Sólidos Volátiles) en las gráficas 4 a la 8.



Gráfica 4 Remoción de Sólidos Volátiles en los cosustratos experimentos 1-3

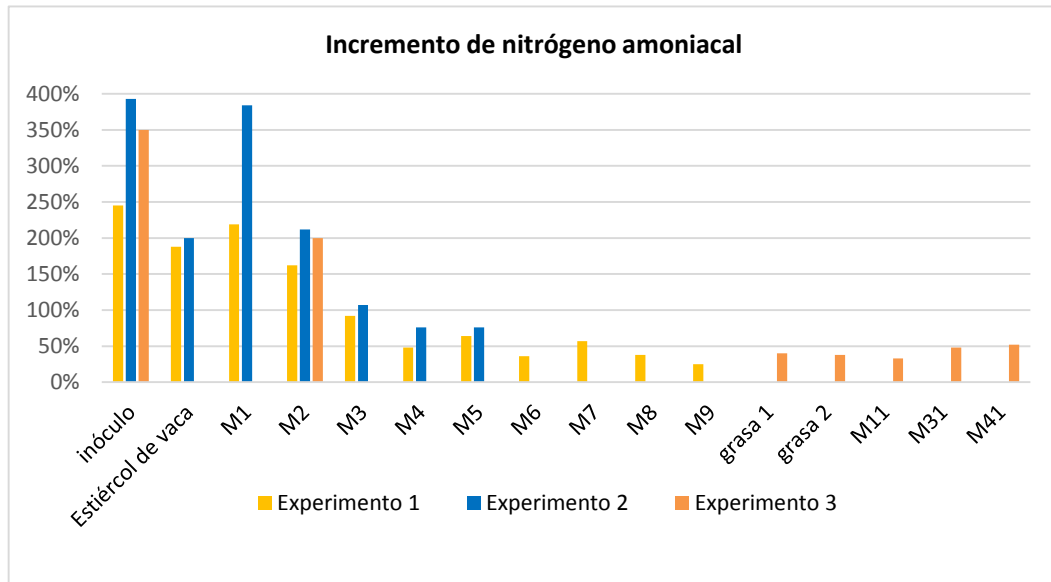
La remoción en el porcentaje de Sólidos Volátiles fue exitosa, ya que la degradación de la materia orgánica en todos los experimentos, con excepción del inóculo y el blanco (estiércol 100%), fue superior al 80%, en los tres experimentos.

La DQO, determina el oxígeno consumido, por vía química, por las materias reductoras presentes en el efluente analizado, utilizando el permanganato de potasio como agente oxidante. Como se muestra en la **gráfica 5**, los porcentajes de remoción de DQO, donde en los experimentos en los que se llevó a cabo la digestión de los cosustratos presentaron diferentes niveles de remoción en DQO, alcanzando los mayores porcentajes de remoción en M1 con 97.4%, seguido de M4 y M6 de 76% y 69.2 %, 59.7% en M5 y 59.3% en M2. El fermentador control de estiércol (M7) no presentó remoción de DQO.



Gráfica 5 Remoción de Sólidos Volátiles en los cosustratos experimentos 1-3

Los aportes de materia orgánica procedentes de residuos ganaderos, incrementan los contenidos en nitrógeno. La totalidad de este nitrógeno no puede ser extraído por los cultivos puesto que el nitrógeno de los residuos ganaderos se encuentra en tres fracciones: mineralizable, orgánica y residual. Como resultado de la digestión anaerobia se presenta un aumento en la concentración del nitrógeno amoniacal. A continuación se presenta la **gráfica 6** donde se muestran los resultados del nitrógeno durante la experimentación en eudiómetros.



Gráfica 6 Incremento de Nitrógeno amoniacal de los cosustratos experimentos 1-3

El principal problema ocasionado por las excretas es la contaminación química debida a la excreción de grandes cantidades de nitrógeno (en forma de nitratos).

Durante el proceso anaerobio, se incrementó el contenido de nitrógeno en el cosustrato al no ser liberado a la atmosfera, como se llevaría a cabo si los residuos estuvieran al aire libre. El amoniaco proviene del nitrógeno excretado, su volatilización depende de la relación existente entre los iones amonio y amoniaco la cual depende del pH de la excreta (Hoeksma et al., 1992).

Aplicando las ecuaciones presentadas en la metodología a los datos obtenidos en las mediciones diarias del gas en los eudiómetros, para determinar el rendimiento de producción de biogás a partir de un gramo de residuos, en cm^3 de biogás por gramo de residuos. ($\text{cm}^3 / \text{g SV}$), se obtienen los resultados mostrados en las tablas 9-11 para los experimentos 1-3 respectivamente.

Tabla 7 Producción de biogás durante 27 días de digestión. Experimento 1

Composición (L)	ID	Suma de volúmenes de gas específicos	Producción de biogás en L/Kg SV	Producción de biogás en Nml/gSV	Producción de biogás real en el día 27 L/K	Suma de la producción de metano específica y total (L)	Producción de biogás en L/KgSV hasta el día 27
Inóculo	Inóculo	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Estiércol de vaca	Est vaca	55.9	53.5	8.4	52.2	14.2	12.6
Est vaca/suero de leche	M1	34.6	32.5	0.5	32.5	24.1	22.8
Est vaca/grasa	M2	60.4	57.5	9.0	56.3	43.5	41.6
Est vaca/pollinaza	M3	44.5	41.7	5.5	40.4	31.2	29.3
Est vaca/Est cerdo	M4	35.3	32.6	5.8	31.3	26.5	24.8
Est cerdo/grasa	M5	37.9	35.1	7.0	37.6	29.5	27.7
Est cerdo/suero	M6	23.5	21.6	3.8	21.9	17.2	16.0
Est cerdo/pollinaza	M7	41.7	38.8	6.9	37.6	29.2	27.3
grasa/suero de leche	M8	30.6	28.1	3.3	27.2	17.4	15.8
Inoculo/Estiércol de vaca	M9	51.3	48.8	10.0	63.0	34.0	32.4

La digestión se llevó a cabo durante 27 días, los resultados que se muestran en la **Tabla 9** se representan la producción de biogás que se obtuvo en los diferentes fermentadores.

La codigestión llevada a cabo en M2 compuesta por Estiércol de vaca y grasa, fue la que presentó mayor producción de biogás con 41.6 L/KgSV.

Tabla 8 Producción de biogás durante 27 días de digestión. Experimento 2

Composición (L)	ID	Suma de volúmenes de gases específicos	Producción de biogás en L/Kg SV	Producción de biogás en Nml/g sv	Producción de biogás real en el día 27 L/K	Suma de la producción de metano específica y total (L)	Producción de biogás en L/KgSV hasta el día 27
Inóculo	Inóculo	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Blanco estiércol vaca	Est vaca	397.7	396.4	45.7	309.3	31.2	230.6
Est vaca/suero de leche	M1	21.8	21.1	1.5	18.8	13.0	12.7
Est vaca/grasa	M2	99.7	97.9	19.2	91.6	72.4	72.1
Est vaca/Est cerdo	M4	33.6	32.7	3.2	31.3	19.6	19.2
Est cerdo/grasa	M5	23.1	21.5	3.8	20.5	12.9	12.1

El experimento 2 se llevó a cabo con los cosustratos que presentaron mejor producción de biogás, así como mayor porcentaje de metano en el experimento anterior (Ver tabla 9).

Durante el experimento 2 fue posible observar que el Estiércol de Vaca/Grasa (M2), fue el cosustrato con mejor producción de biogás al estar por encima de los demás con 72.1 L/KgSV. (Tabla 10). También se observa que el experimento blanco de Estiércol de vaca presentó alta cantidad de biogás, sin embargo no así en cuanto a porcentaje de metano, al tener bajas cantidades de entre 20 y 30% de CH₄ en el biogás.

Tabla 9 Producción de biogás durante 27 días de digestión. Experimento 3

Composición (L)	ID	Suma de volúmenes de gases específicos	Prod. de biogás en L/Kg SV	Prod. de biogás en Nml/g sv	Prod. de biogás real.	Suma de la prod. de metano (L)	Prod. de biogás en L/KgVS.
Inoculo	Inóculo	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3
Inoculo	Inóculo	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3
Grasa	Grasa 1	1.4	0.0	0.0	0.0	2.2	2.2
Grasa	Grasa 2	2.7	0.2	0.07	0.23	2.4	2.4

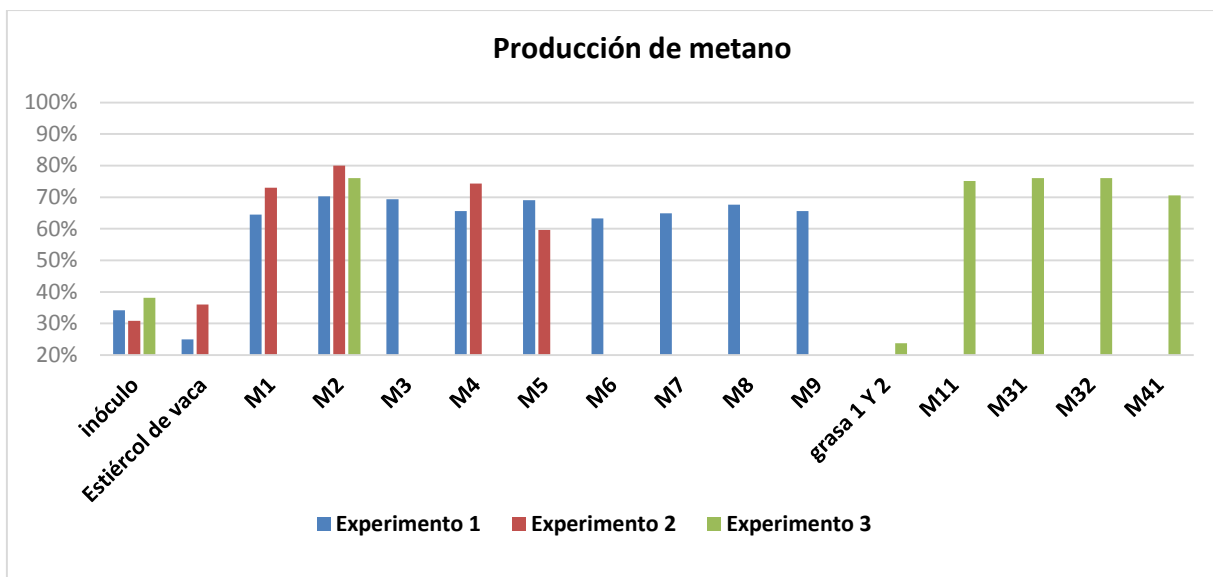
Est vaca/grasa/est cerdo/suero leche	M12	27.1	26.2	2.9	26.1	18.8	18.8
Est vaca/grasa	M21	61.4	60.3	8.0	60.3	42.5	42.4
Est vaca/grasa	M22	76.1	80.3	10.7	80.3	54.9	54.9
Grasa/suero leche	M31	73.2	72.0	10.3	71.8	48.2	48.2
Grasa/suero leche	M32	76.7	75.5	10.7	74.9	59.1	58.2
Est cerdo/est vaca/grasa	M41	29.7	28.6	4.320	30.3	18.4	18.4
Est cerdo/est vaca/grasa	M42	49.3	48.2	6.366	48.1	30.4	30.4

Durante el tercer experimento en eudiómetros se incluyó nuevamente M2 al haber sido el mejor cosustrato en los dos experimentos anteriores. En esta ocasión se sometió a la digestión por duplicado y se incluyeron nuevas proporciones entre los cosustratos de la investigación.

Obteniendo finalmente la mejor generación de biogás a partir de la codigestión por M21, M22, M31 y M32. Con una producción de biogás de entre 42 y 58 L/KgSV.

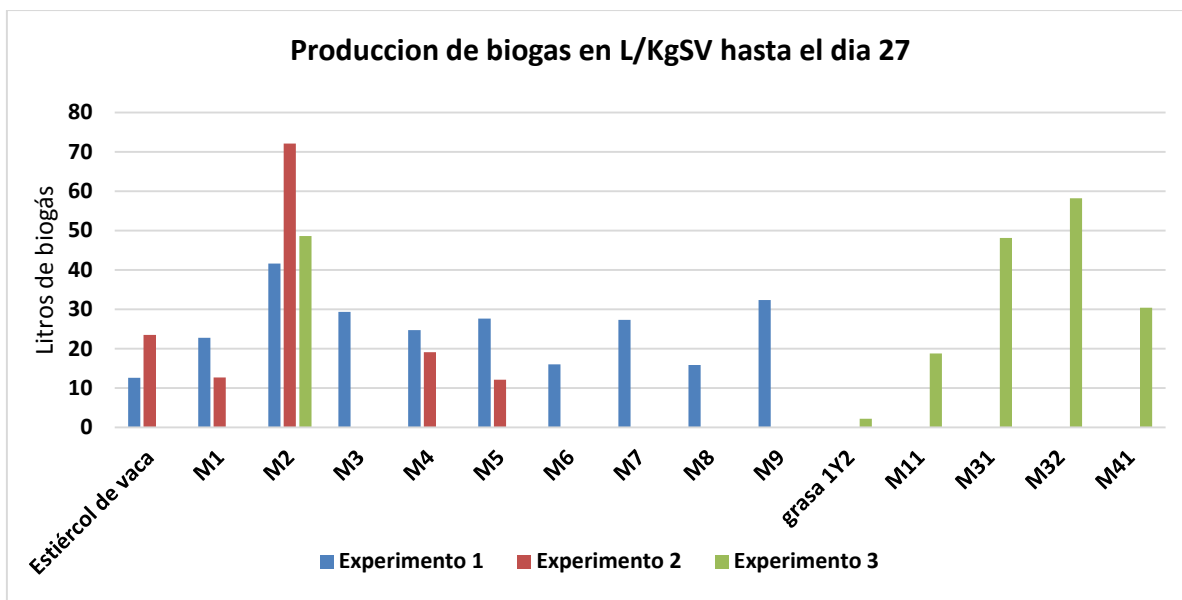
En la gráfica 7 se muestran todos los cosustratos y sus respectivos porcentajes de producción de metano obtenidos. Se concluye que la mayoría de las codigestantes se encontraron dentro del rango esperado de entre 60% y 70% de metano, siendo M2 el cosustrato que alcanzó los mejores porcentajes en los tres experimentos. Los porcentajes más bajos de metano fueron del inóculo, aunque no se esperaba mayor rendimiento. La grasa por sí sola no generó porcentaje satisfactorio de metano ya que alcanzó como máximo un 24% de CH₄ en el biogás.

La adición de inóculo favoreció la producción de metano comparados con el control, (Estiércol 100%) como se observó en la gráfica 8, ya que representó un mayor contenido de microorganismos adaptados a la digestión aumentando el efecto de la actividad metanogénica, haciendo eficiente el consumo del sustrato y por tanto produciendo más metano.



Gráfica 7 Producción de metano generado por cada cosustrato durante la digestión. Experimentos 1-3.

En la gráficas 8 se muestran todos los cosustratos y su respectiva producción de biogás. Se concluye que la mayoría de las codigestantes se encontraron dentro del rango entre 12 y 70 L/KgSV de biogás sumados durante los 27 días del experimento, siendo M2 el cosustrato que alcanzó los mejores porcentajes en los tres experimentos. Los porcentajes más bajos de metano fueron del inóculo, aunque no se esperaba mayor rendimiento. La grasa por sí sola no generó una producción satisfactoria de biogás, al presentar porcentaje de metano de 23.7%.



Gráfica 8 Producción de biogás L/KgSV durante la digestión. Experimentos 1-3.

Se realizó la caracterización de los sustratos para definir los codigestantes para la fermentación en eudiómetros. El TRS fue de 27 días para los tres experimentos, bajo las mismas condiciones de temperatura (37°C) y agitación (600rpm).

Para el experimento 1, la mayor generación en volumen de biogás se presentó en M2 (Estiércol de vaca 80%/Grasa 20% inoculado) con 42 L/Kg SV y M9 (Estiércol de vaca 100% inoculado) con 32 L/Kg SV al término de la digestión de 27 días.

En cuanto al porcentaje de metano (CH₄) obtenido en el experimento 1, Las mejores codigestantes fueron M2 (Estiércol de vaca 80%/grasa 20% inoculado) y M5 (Estiércol de cerdo 83%/grasa 17% inoculado) con una calidad de 67.13% y 67.11% respectivamente.

En el experimento 2, nuevamente M2 (Est vaca/grasa inoculado) obtuvo los mejores valores en cuanto a porcentaje de metano con 76%. Aunque es la misma composición para M2 en ambas corridas, se obtuvo una generación de biogás de 9 Nml/g SV en corrida 1 y 20 Nml/g SV para la corrida 2. El cosustrato con mejor producción de metano en el experimento 3 fue M2 (Est vaca/grasa inoculado) alcanzando 80% de metano (CH₄) y Producción de 42.4 L/KgVs de biogás durante los 27 días de digestión.

La producción en Litros de biogás por Kg de sólido Volátil, fueron los obtenidos en la codigestión del estiércol de vaca con grasa residual, con una producción de biogás de 41.6 L/KgSV para el experimento 1. Mientras que para el experimento 2 la producción de biogás fue de 72.1 L/KgSV, Observando un aumento del 42% entre los experimentos 1 y 2. Por otro lado en el experimento 3, se obtuvo una producción de biogás de 42.4 L/KgSV y 54.9 L/KgSV. A pesar de haberse sometido a digestión bajo las mismas condiciones de temperatura (37°C), tiempo de residencia de 27 días, y la misma composición en codigestión de 80% estiércol 20% grasa En el experimento tres nuevamente el mejor rendimiento estuvo en la mezcla de estiércol de vaca con grasa 42.4 L/KgSV y 54.9 L/KgSV, sin embargo se pudo observar que el suero de leche residual de la producción de queso, al encontrarse en codigestión con el estiércol de vaca presentó rendimiento de 48.2 L/KgSV y 58.2 L/KgSV.

8.4 Resultados de la operación en el biodigestor horizontal agitado

Se realizaron tres cargas en el reactor (Anexo 8), la composición descrita en la **Tabla 12** fue elegida a partir de los resultados obtenidos en los experimentos de los eudiómetros, ya que los cosustratos que demostraron mejor rendimiento. En la **Tabla 12** se muestra la composición de las tres cargas que se llevaron a digestión en el biodigestor. Las condiciones que se mantuvieron constantes durante la digestión fueron: Temperatura 37°C ±2°C y agitación de 1550 rpm 1 h/día.

Tabla 10 Composición de las cargas C1, C2 Y C3 en el biodigestor

CARGA	C1 (Kg)	C2 (Kg)	C3 (Kg)
Inóculo (LA)	15	4	4
Estiércol de vaca	7.5	0.24	0.24
Grasa Residual	0.75	0.03	0.03
Suero de leche	0.75	0.03	0.03
Carga total (Kg)	24	4.3	4.3

La primera carga del reactor se llevó al 80% de su máxima capacidad (30Kg), para así obtener datos de producción de biogás a dicha capacidad y posteriormente compararla con los resultados que se obtuvieran en las cargas C2 y C3, ya que estas fueron consideradas escalando en un 1:10 las proporciones que fueron utilizadas durante la etapa de experimentos en eudiómetros.

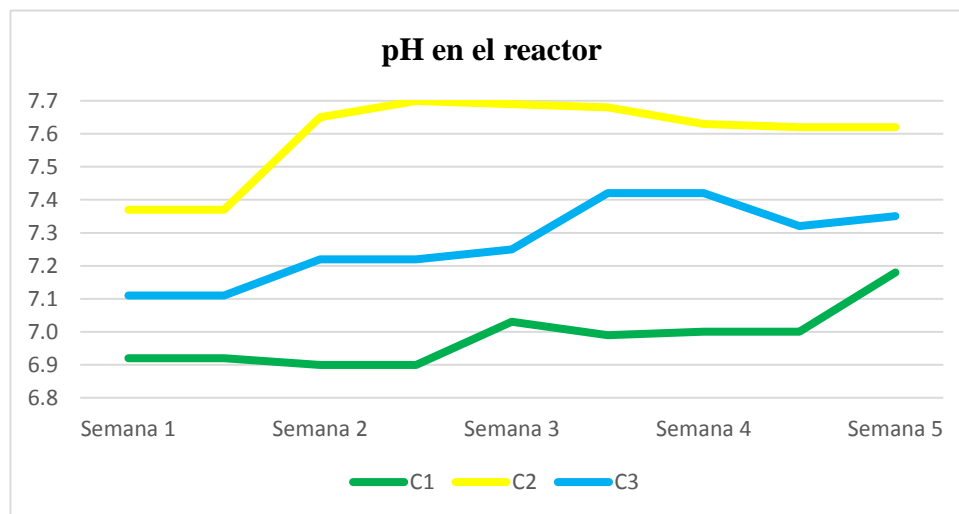
Con este método se logra conocer si existe una optimización en la carga de sustratos y determinar la mejor combinación que utilice menor carga de materia orgánica y represente el mismo rendimiento de biogás que cuando se carga el reactor al 80% de su máxima capacidad.

En la figura 12 se observa la instalación del biodigestor horizontal piloto, al que se le adaptó un sistema de medición del gas por desplazamiento de volumen basado en una técnica de Actividad metanogénica específica (Torres, P; 2010). (Anexo 9)



Figura 8. Montaje del Biodigestor con sistema de medición de gas por el método volumétrico.

- a) Biodigestor tipo flujo pistón b) Tablero control de agitación y Temperatura c) Trampa de NaOH (10 g/L) d) Indicador de desplazamiento de volumen (Probeta graduada) e) Válvulas para control del paso de biogás f) Punto de muestro de biogás g) Medidor portátil de metano (CH₄) h) Válvula de purga de lodos.



Gráfica 9 pH durante la digestión

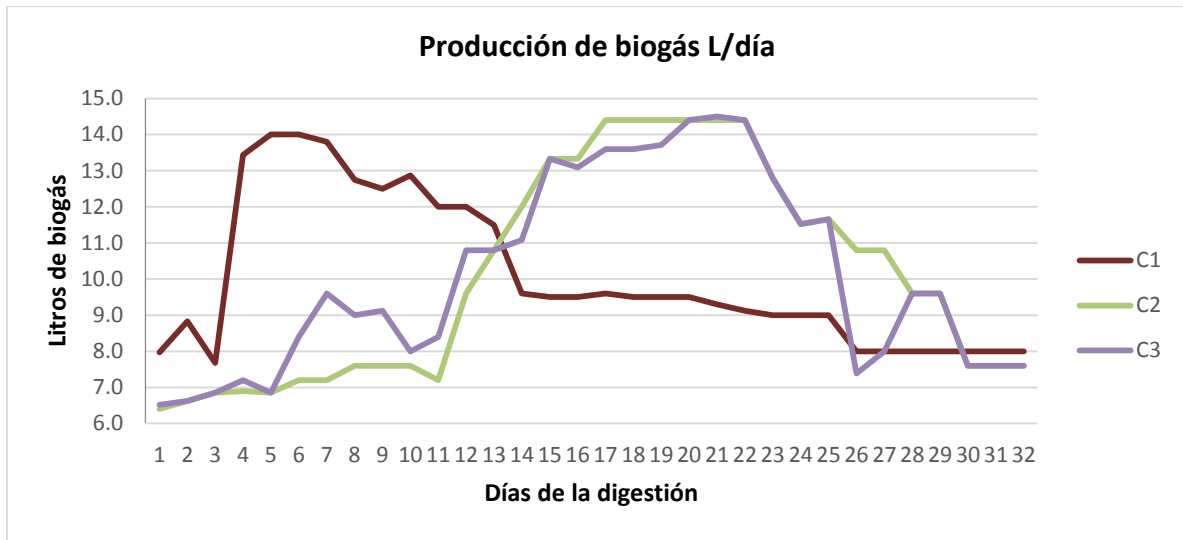
Como se observa en la gráfica 9, el pH se mantuvo dentro del rango deseado (6.5-7.5) durante la digestión en las tres cargas al reactor.

8.4.1 Medición de biogás

La medición del biogás se llevó a cabo por el método volumétrico que se basa en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia desplazante, como el NaOH el KOH, en un rango de 15 -20 g/L (Field, 1987), por su propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido.

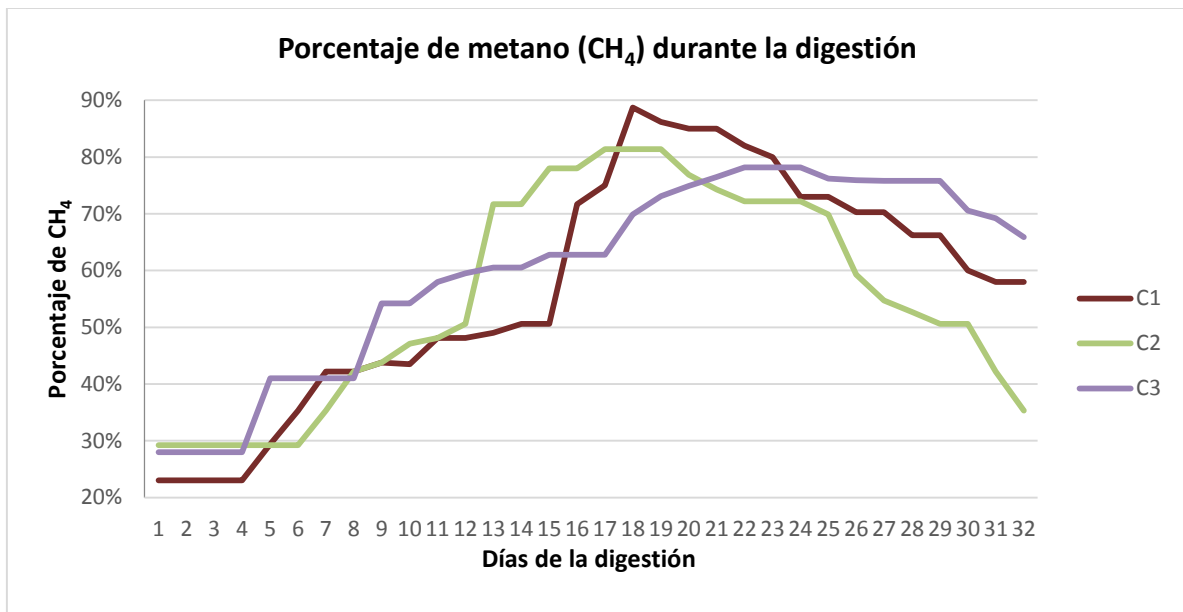
El valor óptimo para la digestión metanogénica es de 6.5-7.5, (Kaliart al., 2008; Chen et al., 2008), fuera de este rango es posible que el proceso metanogénico sea inhibido. El pH se controló sacando una cantidad conocida de efluente del sistema y agregando sustrato fresco en la misma cantidad.

En la gráfica 10 se muestran los resultados del volumen de biogás medido con el sistema que se describió anteriormente.



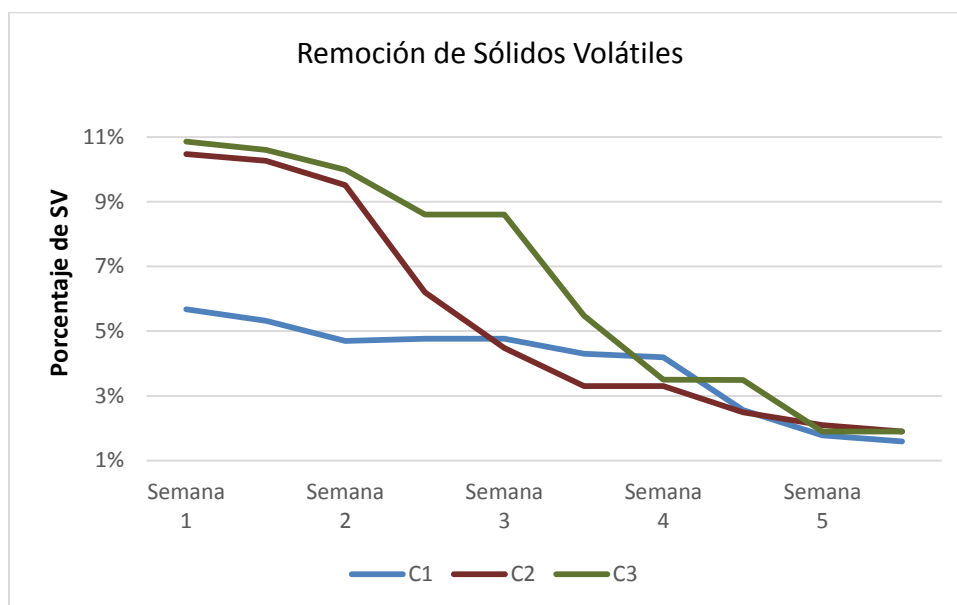
Gráfica 10 Producción de biogás promedio diario

El volumen promedio de biogás durante la digestión fue de 9.8 l/día para la carga C1 al reactor demostrando mayor estabilidad en la producción los días 14 al 25. En la carga C2 y C3 el volumen promedio de biogás fue de 14 y 13.7 L/d respectivamente. Presentando ambos la mayor estabilidad en los días 15 a 22. (Gráfica 10)



Gráfica 11 Porcentaje de metano contenido en el biogás durante la digestión en el reactor.

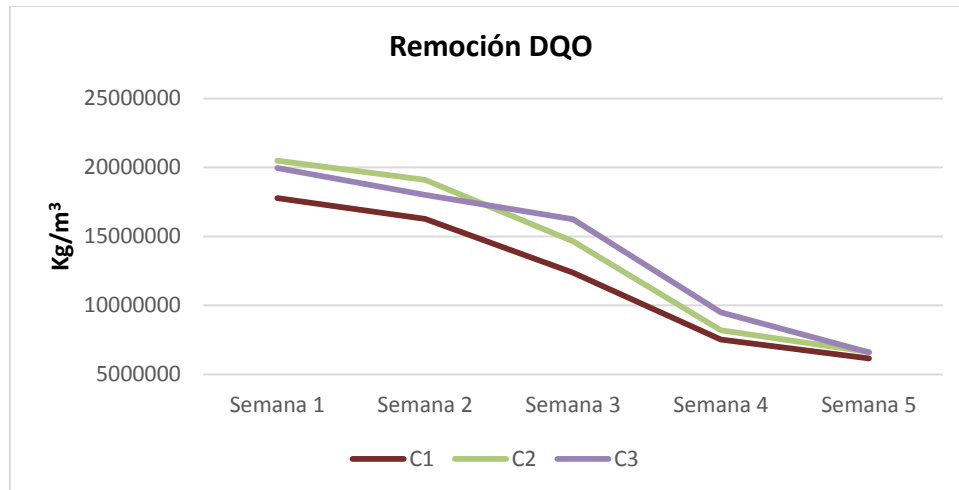
Se conoció el porcentaje de metano por medio del medidor de biogás portátil marca Landtec. (Ilustración 3 g). El mayor porcentaje de metano (CH_4) se alcanzó entre los días 16 al 25, siendo el valor más alto de 88.7% en el día 18 para C1. Mientras que en C2 se alcanzó estabilidad en la mayor producción de metano de los días 13 al 25 con un máximo de 81% de metano en el biogás y 78% en C3, en ésta ultima los días del 18 al 30.



Gráfica 12 Remoción de sólidos volátiles

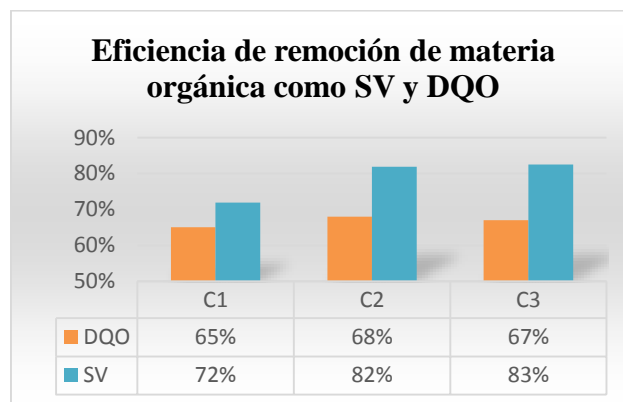
La materia orgánica en forma de Sólidos Volátiles (SV) tuvo una degradación del 72% durante la digestión. El valor inicial de SV del inóculo (lodos anaerobios) es de 1.79%, y en el último día de la digestión el porcentaje de SV en C1 es de 1.59%. (Gráfica 12)

El tiempo de residencia se determinó en base a la remoción de SV, cuando la concentración disminuyó hasta el valor inicial de SV en el inóculo, entonces se realizó la purga al reactor, sustituyendo la cantidad drenada por la misma.



Gráfica 13 Remoción de DQO

La materia orgánica e inorgánica presente en el reactor y representada como DQO y Sólidos Volátiles (SV) fue degradada con una eficiencia que se muestra en la gráfica 14.



Gráfica 14 Eficiencia de remoción de SV y DQO en el reactor horizontal

Tabla 11 Rendimiento de materia orgánica en términos de Litros de biogás por Kilogramo de Sólido Volátil de materia orgánica (cosustrato)

CARGA	C1	C2	C3
Lodo anaerobio	15 Kg	4 Kg	4 Kg
Estiércol (Kg)	7.5	0.24	0.24
Grasa (Kg)	0.75	0.06	0.03
Suero de leche (L)	0.75	0.03	0.03
volumen (Kg)	24	4.3	4.3
Promedio L biogás/día	11.5	11.9	11.7
biogás producido (L)	292	300	296
Producción de biogás en L/Kg SV	3.6	1001	986

La tabla 13 representa el rendimiento de biogas por unidad de materia orgánica expresada en Litros de biogás por Kilogramo de Sólido Volátil de materia orgánica (cosustrato).

Se puede observar que la carga C1 en el reactor se llevó al 80% de su capacidad máxima de 30 Kg y conservando las proporciones de la mezcla en codigestión que se utilizó en la etapa de los eudiómetros. Posteriormente las cargas C1 y C2 en el reactor fueron disminuidas con la finalidad de utilizar una proporción menor de cosustrato dentro del reactor y que representara el mejor rendimiento de biogás obtenido.

Una diferencia en el experimento dos fue la utilización de estiércol más fresco que en el primer experimento. Por lo tanto se considera importante, la utilización de estiércol fresco para la codigestión.

En las Cargas C1 y C2 del reactor se comprobó que se puede obtener el mismo rendimiento de biogás por unidad de biomasa al utilizar sólo el 14% de carga de su capacidad total, ya que comparado con los resultados de la carga C1 en donde se cargó al 80% de su capacidad total, el rendimiento de biogás en litros durante el tiempo de residencia fue de 10L/d de biogás en promedio.

El porcentaje de metano en la mezcla del biogás se encontró entre 70 y 80% en los codigestantes M2 (Estiércol de vaca/grasa) y M3 (grasa/suero de leche) con 80% y 76% respectivamente. Por

lo tanto se obtuvo un biogas mejorado contra lo que se estimó en resultados bibliográficos de 60% (Lombardi et al., 2009) en cuanto a su contenido de metano. En el reactor horizontal se observó un porcentaje de 88% de metano en el biogás dentro de los días 13 y 26 de la digestión.

Al cargar en un 80% de su capacidad máxima el reactor horizontal se obtuvo un rendimiento de 3.6 L/KgSV.

9 CONCLUSIONES

Se concluye que la escala 1:10 del eudiómetro al digestor horizontal es la adecuada para obtener los mejores resultados de producción de biogás. En las cargas C1 y su repetición C2, se encontró la carga óptima del reactor horizontal, al obtener con tan solo el 14% de su capacidad máxima rendimientos de biogás de 1001 L/KgSV y 986 L/KgSV respectivamente. Todas las cargas con un tiempo de residencia de 32 días, observándose de los días 12 al 25 la producción de biogás más estable. A diferencia de la carga C1, donde la mayor producción de biogás se presentó del día 3 al 14.

Siendo las anteriores las mejores condiciones de operación de carga y tiempo de residencia en éste reactor horizontal, recomendadas para aumentar la producción de biogás, mejorando el porcentaje de metano contenido.

Hablando de producción de metano para las pruebas en eudiómetro, se alcanzaron los porcentajes esperados, ya que de las 16 diferentes mezclas totales solamente el inóculo de lodos anaerobios y ambos controles; grasa y estiércol de vaca, presentaron porcentajes de metano menores al 30%, por su parte el resto de las mezclas en codigestión con un 60% de metano en el biogás. Y por encima del 70% de metano en el biogás se ubicaron Estiércol de vaca/suero de leche, Estiércol de vaca/grasa, Estiércol de vaca/Estiércol de cerdo. También se observó en la codigestión entre los 4 anteriores, presentando hasta un 74% de metano en la mezcla, sin embargo ésta mezcla no tuvo éxito en cuanto al rendimiento de volumen de generación de biogás. Siendo del 80% de metano en el biogás el mayor porcentaje observado en los experimentos en eudiómetros presentado por la mezcla de Estiércol de vaca/grasa.

10 RECOMENDACIONES

Para continuar realizando cargas al reactor horizontal bajo las mismas condiciones y con los mismos codigestantes, se recomienda adaptar una columna de mayor volumen en el sistema de medición de gas por desplazamiento de volumen, de ésta manera se puede lograr una medición más puntual al permitir mayor acumulación del gas en la columna para su medición.

Para lograr un mayor rendimiento de biogás es necesario que los residuos involucrados en codigestión cuenten con un contenido de humedad mayor al 80%, y en el caso específico del estiércol de vaca, presentó mejores resultados cuando se utilizó “fresco” es decir, que no ha sido aireado en pilas para acelerar su secado.

11 BIBLIOGRAFÍA

1. Flotats, X., Campos, E., Bonmatí, A., 1997. Aprovechamiento energético de Residuos ganaderos, Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo Universitat de Lleida
2. Deyanira Muñoz-Muñoz¹, Alvaro Javier Pantoja-Matta, Milton Fernando Cuatin-Guarin., 2014. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial Vol 12 No. 2 (10-19). APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO BIOCOMBUSTIBLE Y BIOREFINERÍA.
3. Masera, Omar. Revista Red mexicana de Bioenergía, A.C. La Bioenergía en México: Estudios de caso No.1 2010 Manuela Prehn-Ivan Cumana
4. Mondaca, Iram. Revista Red mexicana de Bioenergía, A.C. Producción de biogás en México: Estado actual y perspectivas.
5. Ainia, "Valorización energética: producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales". España: Dept. Calidad y Medio Ambiente (Ainia CENTRO TECNOLÓGICO), 2011.
6. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial Vol 12 No. 2 (10-19) Julio - Diciembre 2014 APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO BIOCOMBUSTIBLE Y BIOREFINERÍA Deyanira Muñoz-Muñoz¹, Alvaro Javier Pantoja-Matta², Milton Fernando Cuatin-Guarin³
7. Torres, P; Pérez, A. "Actividad metanogénica específica: una Herramienta de control y optimización de Sistemas de tratamiento anaerobio de aguas Residuales". Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Vol.9.P 5-14,(2010).
8. Ainia, "Valorización energética: producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales". España: Dept. Calidad y Medio ambiente (Ainia CENTRO TECNOLÓGICO), 2011.
9. Funk, Ted. 2007. Anaerobic methane digesters for dairy farms: Are you asking the right questions. University of Illinois.
10. EPA (Environmental protection Agency). 2006. AgSTAR Digest. Accesado el 14 de junio del 2007.

11. Otoniel buenrostro, silke cram, gerardo bernache,gerardo bocco,2000. La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales
12. Montalvo Martínez, Silvio J. (2000). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Generalidades. (Monografía). p.p 1-36.
13. Ruiz, Isabel; Álvarez Juan Antonio y Soto, Manuel. (2002). El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. Universidade da Coruña. Facultade de Ciencias. Campus da Zapateira s/n, 15071 A Coruña (Tesis) p.p. 15-41.
14. Obaya y col, 1991, Lodos anaerobios termófilos del proceso UASB III. Uso del metanol para su adaptación. Revista ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, N0.3, vol. XXV 1991. Pág 33-38.
15. Mansur Aiss, Migue. Tratamiento de aguas residuales en reactores anaeróbicos, de flujo ascendente en manto de lodos (hdt027). [en línea]. En <<http://www.cepis.ops.oms.org/index.htm>> [Consulta: Septiembre 2004]. webmaster@cepis.ops.oms.org.
16. Rao PV, Baral SS. Experimental design of mixture for the anaerobic co-digestion of sewage sludge. Chem Eng J. 2011;172(1- 2):977-86.
17. Kim J, Kang C-M. Increased anaerobic production of methane by co-digestion of sludge with microalgal biomass and food waste leachate. Bioresour. Technol. 2015;189:409-12
18. Cesaro A, Naddeo V, Amodio V, Belgiorno V. Enhanced biogas production from anaerobic codigestion of solid waste by sonolysis. Ultrason Sonochem. 2012;19(3):596-600.
19. Gómez X, Cuetos MJ, Cara J, Morán A, García AI. Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. Renew Energy. 2006;31(12):2017-24.

20. Bond T, Brouckaert CJ, Foxon KM, Buckley CA. A critical review of experimental and predicted methane generation from anaerobic codigestion. *Water Sci Technol.* IWA Publishing. 2012;65(1):183-9.
21. Lin J, Zuo J, Gan L, Li P, Liu F, Wang K, et al. Effects of mixture ratio on anaerobic codigestión with fruit and vegetable waste and food waste of China. *J Environ Sci.* 2011;23(8):1403-8.
22. Cabbai V, Ballico M, Aneggi E, Goi D. BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge. *Waste Manag.* 2013;33(7):162632.
23. Nathan DP, Ronald WT, Steve SH. Comparison of methane production by co-digesting fruit and vegetable waste with first stage and second stage anaerobic digester sludge from a two stage digester. *Water Sci. Technol.* 2012;65(7):1252–7.
24. Herrick J.E., Lai R. Dung Decomposition and Pedoturbation in a Seasonally Dry Tropical Pasture. *Biol Fertil Soils*, volumen 23, 1996: 177-181.
25. Chernicharo I. Methodologies for determining the specific methanogenic activity (sma) in anaerobic sludges, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG Vol.12 - Nº 2 - abr/jun 2007, 192-201.
26. NMX-AA-034-SCFI-2001 Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
27. VDI 4630 “Determinación de biogás y el potencial de producción de metano basado en pruebas de fermentación”.

Páginas web consultadas

28. FIDEICOMISO DE RIESGO COMPARTIDO [Fecha de consulta 07 de Julio de 2015]. Disponible en: <http://www.firco.gob.mx/ProyectosExitosos/Caso1/index.html>
29. RED MEXICANA DE BIENERGÍA [Fecha de consulta 21 de Junio de 2015]. Disponible en: <http://www.rembio.org.mx>

12 ANEXOS

Anexo 1

Muestreo de estiércol en centro de acopio de estiércol de vaca en Pedro Escobedo, Qro.



Anexo 2.

Preparación de los sustratos y medición de pH



Anexo 3

Caracterización de sustratos, pruebas de $\text{NH}_3\text{-N}$, DQO y SV



Anexo 4

DR 6000 UV-VIS Espectrofotómetro marca HACH



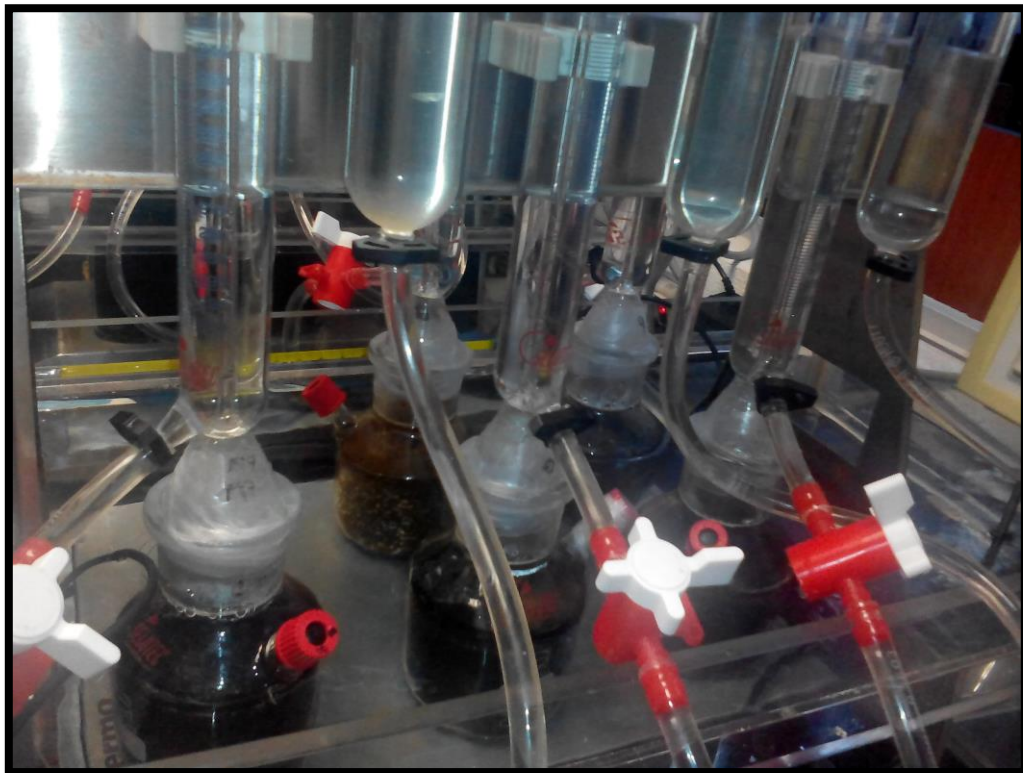
Anexo 5

Montaje de los eudiómetros en el laboratorio de biogas



Anexo 6

Preparación de los fermentadores con los cosustratos y el inóculo



Anexo 7

Biodigestor horizontal piloto con tablero para control de agitación y temperatura



Anexo 8

Carga manual del reactor



Anexo 9

Sistema de medición de biogás por desplazamiento de volumen con trampa de CO₂



Anexo 10

Método para la de Determinación de biogás y el potencial de producción de metano basado en VDI 4630 en pruebas de fermentación

1. Objetivo y Alcance

Este método sirve para realizar pruebas de fermentación (PF) y determinar la producción de biogás y metano de los materiales utilizados en plantas anaerobias. El método se validará en laboratorio utilizando biomasa agrícola para poder ser aplicado a otros materiales.

2. Principio

La prueba será llevada a cabo bajo condiciones anaerobias estándares utilizando un inóculo a temperatura constante. Se agrega a la prueba un sustrato y los sólidos volátiles (S_V) de este sustrato son responsables de la cantidad de biogás que se produce. El método para determinar la cantidad y calidad del biogás se explica en la sección (8.1).

3. Reactivos

- 3.1. El inóculo se debe obtener de una planta anaerobia (se recomienda tener una mezcla de inóculo que provengan de diferentes plantas anaerobias). La composición de inóculo debe tener la siguiente composición: S_V 1-3% y un mínimo de 50% S_V/S_T y una concentración de ácidos grasos de ≤ 500 mg/l. La composición no debe ser exactamente igual a la que se describe, pero tiene que ser comparable.
- 3.2. Material de referencia: Se recomienda utilizar un sustrato de referencia que puede ser celulosa cristalina o silaje de maíz.

4. Material y Equipos

- 4.1. Frascos de vidrio templado (fermentador) con un dispositivo para interceptar (adsorber) gases (VDI-Guía-4630)
- 4.2. Condensador (trampa de enfriamiento) para eliminar el vapor de agua del gas
- 4.3. Eudiómetros, o columna graduada para almacenar el gas
- 4.4. Medidor de calidad de biogás (CH_4 , CO_2)
- 4.5. Equipo para medir la temperatura y la presión atmosférica

El montado del equipo se ilustra en la Figura 4.1

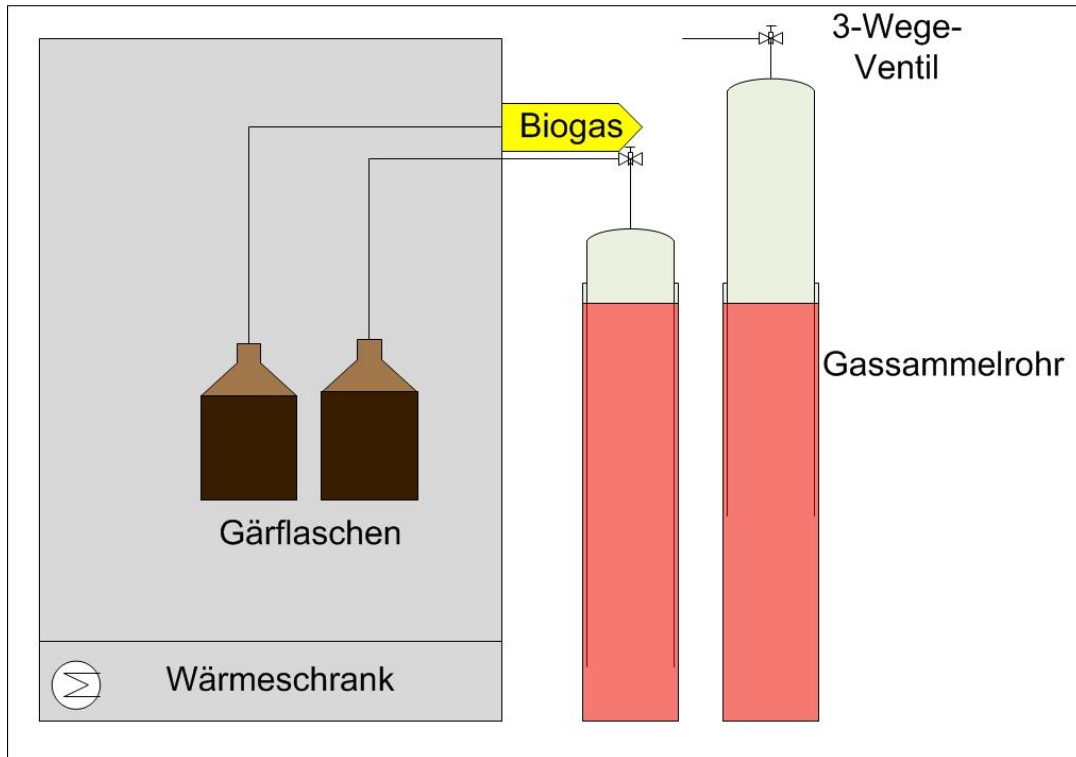


Fig 4.1 Montado de equipo para pruebas de fermentación (DIN 38414-8)

5. Métodos

5.1. Preparación del inóculo y sustrato

El sustrato debe tener un tamaño de partícula de <10 mm. En caso de no tener este tamaño se deben triturar o cortar. Para sustratos como semillas o semillas de aceites estos se deben triturar o moler.

Para cada prueba o inóculo se deben medir los S_T (secado a 105°C hasta alcanzar un peso constante) y S_V y S_V/S_T (quemar a 550°C hasta alcanzar un peso constante).

El S_V/S_T de la prueba debe tener un máximo de 50% de S_V del inóculo. La pesada debe tener como mínimo 1% de exactitud. El S_T de la mezcla de inóculo y sustrato en el fermentador no debe superar 10% del total de la prueba.

Se debe determinar el pH del inóculo, para detectar una acidificación al principio del experimento se recomienda tomar el valor de pH en la prueba antes de iniciar.

Ejemplo:

- Se agrega el 1500 g (± 1 g) de inóculo a los fermentadores de dos litros

- Se prepara el inóculo: se debe agitar el inóculo al menos un día completo → Se toma una muestra en un vaso de precipitado → Se pone el frasco en la balanza (marcando Tara) → Se agrega con cuidado el inóculo al fermentador que se encuentra en la balanza
- Se conectan los eudiómetros con los frascos que contienen el fluido (color rosa) → Se llenan los frascos hasta alcanzar la marcación de 6,5 cm en los cilindros exteriores (este es el punto cero)

5.2 Cálculo del sustrato

- $SV_{\text{inóculo}} = 1.5\%$ a 3%
- A partir de esta relación y tomando como base $1,500\text{ g}$ se puede calcular la cantidad de sustrato que se requiere

$$- \quad pi = \frac{mi * SV_i}{ms * SV_s} \quad \text{para } pi=2 \text{ y } mi=1500g \quad ms = \frac{1500 * SV_i}{2 * SV_s} \quad [g]$$

Para $Mi=400g$

- $pi = \text{relación en masa}$
- $ms = \text{cantidad de sustrato (g)}$
- $mi = \text{cantidad de inóculo (g)}$
- $SV_i = \text{concentración de inóculo (oTS en \% Materia fresca)}$
- $SV_s = \text{concentración del sustrato (oTS en \% Materia fresca)}$

5.3 Inicio del experimento

Agregar el sustrato a los frascos que se deben sellar perfectamente y agitar con cuidado → se debe registrar en el protocolo la hora de inicio, la presión atmosférica, la temperatura ambiente y del biogás. La temperatura del baño de agua caliente debe estar a condiciones mesofílicas $37 \pm 2^\circ\text{C}$.

Los fermentadores se deben agitar todos los días. Se debe evitar que se forme una capa flotante que evite que el gas llegue al eudiómetro.

Se debe montar una prueba estándar para determinar la producción del biogás del inóculo. Cada prueba debe montarse por duplicado

6. Mediciones

Las mediciones de producción de biogás de deben realizar de manera continua para evitar que exista una sobrepresión en los pequeños fermentadores y disminuir la probabilidad de fugas de biogás.

Para cada medición se debe registrar la presión atmosférica, la temperatura ambiente y del biogás en el momento y en el lugar en donde se hacen las mediciones de volumen. En unas horas se deben revisar los frascos, es probable que en algunas pruebas ya se pueda hacer la medición de biogás.

Las mediciones de gas deben ser en mm. Es recomendable hacer mediciones de calidad de biogás (contenido de CH₄ y CO₂) diario, si no es posible debido a que se produzca menos de 90 mm de biogás entonces se deja acumular más hasta lograr el volumen necesario. Para realizar las mediciones se conecta el analizador de biogás a la parte superior del eudiómetro → se abre la válvula y se realiza el análisis de calidad de biogás, inmediatamente después se debe cerrar la válvula de biogás y se desconecta el equipo.

Las mediciones de biogás se terminan cuando los siguientes criterios se cumplan:

- c) al menos 25 días de fermentación
- d) cuando durante tres días seguidos como mínimo la cantidad de gas disminuya periódicamente en un 0.5%.

El valor de pH de la prueba al final de la fermentación debe ser medida para poder comprobar que no hubo acidificación durante el tiempo de experimentación.

7. Evaluación

La evaluación de producción de biogás se realiza con las cantidades de biogás producidas por día. Después se obtendrá la sumatoria de las cantidades producidas por día durante todo el experimento.

- Para calcular la producción diaria de biogás en volumen se necesita la siguiente formula:

$$V = \frac{\pi * d^2}{4} * h \quad (Ec. 1)$$

$$V = \pi * r^2 * h \quad (Ec. 1)$$

V= Volumen de gas

d= diámetro interno del cilindro (12,75cm)

h=producción de biogás en mm

- La producción de biogás puede ser en base a la materia fresca (MF), la masa de sólidos volátiles o en caso de que se tenga un alto contenido de ácidos volátiles se debe calcular la masa de sólidos volátiles. Este cálculo es la suma de sólidos volátiles con el contenido de ácidos orgánicos.
- Esto aplica también para el cálculo de la producción de metano.

7.1. Volumen de biogás por medición

La cantidad de biogás producida se debe calcular en litros Normalizados (gás seco a 273.15 K y 1013.25 mbar):

$$F = \frac{(p - p_{H_2O}) * T_o}{(t + 273.15) * p_o} \quad (Ec. 2)$$

$T_o = 273,15$ K (Temperatura estándar)

$t =$ Temperatura del gas °C

$p_o = 1013,25$ mbar (Presión estándar)

$p =$ Presión del aire (presión registrada diario) mbar

La presión de vapor del agua p_{H_2O} puede obtenerse de tablas (VDI-Guía 4630). La presión de vapor del agua en función de la temperatura puede representarse por la siguiente función en un rango de temperatura de 15-30°C (R2=99,997%):

$$p_{H_2O} = y_0 + a * e^{b*t} \quad (Ec. 3)$$

$y_0 = -4,39605$

$a = 9,762$

$b = 0,0521$

De la Ec. 2 y el volumen diario de biogás, se calcula el volumen de biogas normalizado:

$$V_{OP} = V_p * F \quad (Ec. 4)$$

V_{OP} =Volumen de biogás normalizado en (Nml)

V_p =Volumen diario de biogás (ml).

7.2. Suma de volúmenes de gas específicos

Se obtendrá la sumatoria de las producciones de biogás específicas → Se tiene que hacer la corrección con el estándar → El cálculo será en función del S_v .

$$V_{T_s} = \left(\sum_{i=1}^n V_{OP_i} - \frac{m_p}{m_B} * \sum_{i=1}^n V_{OB_i} \right) * V_s^{-1} \quad (Ec. 5)$$

V_{T_s} = producción específica de biogás en $\frac{Nml}{Kg_{V_s}}$ acumulada hasta el día n

V_{OP_i} = producción de biogás en el día i en Nml

m_p = masa del inóculo en el fermentador con prueba

m_B = masa del inóculo en el fermentador del estándar

V_{OB_i} = producción de biogás del estándar en el día i Nml

V_s = pesada de S_v en kg

$$V_T = \left(\sum_{i=1}^n V_{OP_i} - \sum_{i=1}^n V_{OB_i} \right) * V_s^{-1} \quad (Ec. 5.1)$$

V_T = producción de biogás en L/Kg_{V_s} hasta el día n

Desglosando la fórmula:

De la cantidad de biogás normalizada se resta la cantidad del gas del inóculo estándar

$$V_{R_i} = V_{OP_i} - V_{OB_i} \quad (Ec. 6)$$

V_{R_i} = producción de biogás real en el día i Nml

La producción de biogás en NLitros/kg Masa Fresca (FM) se calcula:

$$V_T = \sum \frac{V_{R_i}}{m_s} \quad (Ec. 7)$$

V_T = producción total de biogás en Nml/g_{MF}

m_s = masa de la prueba en el fermentador g

La producción de biogás NmL/gsv

$$V_T = \sum \frac{V_{R_i}}{m_s * \%S_V(FM)} \quad (Ec. 7)$$

V_T = producción total de biogás en Nml/g_{MF}

$\%S_V(FM)$ = porcentaje de sólidos volátiles de material fresco

7.3. Producción de metano

El cálculo de la producción de metano se basa en la cantidad de gas normalizada y la correspondiente concentración de CH₄ (5.3). Para esto se recomienda una estandarización en las mediciones de concentración de CH₄ y del CO₂. La estandarización consiste en corregir la concentración de CH₄, porque la medición incluye un residual de agua de vapor, que hay que eliminar en el cálculo. La corrección también toma en cuenta el espacio vacío donde se almacena gas en el fermentador considerando el volumen total del fermentador. Ya que al principio se inyecta gas inerte en el volumen del gas y es importante que se considere en el cálculo.

$$CH_{4p} = V_{OP} * \frac{C_{PCH_4}}{C_{PCH_4} + C_{PCO_2}} \quad (Ec. 8)$$

CH_{4p} = Cantidad de metano en la prueba en NL

V_{OP} = Cantidad de gas en prueba en NL

C_{PCH_4} = Medición de la concentración de CH₄ en el biogás de la prueba en %

C_{PCO_2} = Medición de la concentración de CO₂ en el biogás de la prueba en %

Para el estándar

$$CH_{4B} = V_{OB} * \frac{C_{BCH_4}}{C_{BCH_4} + C_{BCO_2}} \quad (Ec. 9)$$

CH_{4B} = Cantidad de metano en el inóculo en NL

V_{OB} = Cantidad de gas en el inóculo en NL

C_{BCH_4} = Medición de la concentración de CH_4 en el biogás en el inóculo en %

C_{BCO_2} = Medición de la concentración de CO_2 en el biogás en el inóculo en %

Nota: En caso de que no se determine la concentración de CO_2 en el biogás, se deben hacer las mediciones de CH_4 en el gas seco para que sea confiable.

7.4. Suma de la producción de metano específica y total

$$CH_{4T_s} = \left(\sum_{i=1}^n CH_{4P_i} - \frac{m_p}{m_B} * \sum_{i=1}^n CH_{4B_i} \right) * V_s^{-1} \quad (Ec. 5)$$

CH_{4T_s} = producción específica de metano en $\frac{Nml}{Kg_{V_s}}$ acumulada hasta el día n

CH_{4P_i} = producción de metano en el día i en Nml

m_p = masa del inóculo en el fermentador con prueba

m_B = masa del inóculo en el fermentador del estándar

CH_{4B_i} = producción de biogás del estándar en el día i Nml

V_s = pesada del SV en kg

i = días durante el experimento

$$CH_{4T} = \left(\sum_{i=1}^n CH_{4P_i} - \sum_{i=1}^n CH_{4B_i} \right) * V_s^{-1} \quad (Ec. 5.1)$$

CH_{4T} = producción de biogás en L/Kg_{V_s} hasta el día n