

Capítulo 4 Desarrollo de un prototipo para detección de metano y su concentración en procesos de generación de energía a partir de biomasa

Chapter 4 Development of a prototype for methane detection and concentration in biomass power generation processes

PINEDA-CARDENAL, Orlando†¹, ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth^{1*}, OLIVOS-ORTIZ, Aramis² y CHARRE-IBARRA, Saida¹

¹Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica, Carretera Manzanillo-Barra de Navidad Km 20, El Naranjo, 28860, Manzanillo, Colima, México.

²Universidad de Colima, Facultad de Ciencias Marinas, Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Carretera Manzanillo-Barra de Navidad Km 20, El Naranjo, 28860, Manzanillo, Colima, México.

ID 1^{er} Autor: *Jesús Orlando, Pinea-Cardenal* / **ORC ID:** 0000-0003-4958-1283

ID 1^{er} Coautor: *Janeth, Alcalá-Rodríguez* / **ORC ID:** 0000-0002-0238-3952

ID 2^{do} Coautor: *Aramis, Olivos-Ortiz* / **ORC ID:** 0000-0002-9886-9817

ID 3^{er} Coautor: *Saida, Charre-Ibarra* / **ORC ID:** 0000-0002-3823-5388

DOI: 10.35429/H.2021.10.66.88

O. Pineda, J. Alcalá, A. Olivos y S. Charre

*janethalcala@ucol.mx

J. Gudiño, E. Hernández, S. Charre, J. Alcalá y M. Duran (AA. VV.). Proyectos de Ingeniería Aplicada, Ciencia y Tecnología ©ECORFAN- México, 2021.

1. Introducción

La situación mundial de contaminación y de calentamiento global debido a los gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de la generación de energía y la actividad humana está alcanzando niveles críticos, por lo que México y la mayoría de las naciones trabajan en la creación de acuerdos y planes a futuro cercano, medio y lejano para generar estrategias que contribuyan y promuevan métodos de generación de energía y consumo de energía alternativos limpios y ambientalmente amigables. En este sentido, las naciones tanto desarrolladas como en vía de desarrollo se han comprometido a trabajar unidas, de manera ambiciosa, progresiva, equitativa y transparente, para limitar el incremento de la temperatura global impulsando nuevas formas que buscan reconciliar la actividad humana con un uso y desarrollo sustentable de los recursos disponibles en el mundo y de acuerdo al objetivo de Conferencia de las Partes, conocida como COP en su edición 26 se busca lograr compromisos de acción para mantener el calentamiento global "bien por debajo" de 2 grados centígrados (y alcanzar 1.5 °C) para evitar una catástrofe climática.

En el protocolo de Kioto que entró en vigor en febrero de 2005 (Solórzano, 2003) se estableció como uno de los objetivos reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en especial los producidos por el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) como una medida para reducir los efectos de los GEI.

De acuerdo a los datos de actualización en Laureles (2021) generados a partir del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (Inegycei), en 2019 México emitió 737 millones de toneladas de CO₂, colocándose como uno de los 13 países mayores emisores del mundo. Tal y como se muestra en la Gráfico 1, el CO₂ representa el 74% de los GEI como resultado del uso de combustibles fósiles por la generación de electricidad y calor por transporte, manufactura y consumo. El uso de suelo por la silvicultura contribuye con el 3.3% principalmente por la deforestación. El CH₄ y el N₂O representan el 17.2% y el 6.3% de los GEI, producto de la agricultura, el tratamiento de residuos y la quema de gas. Los gases fluorados de los procesos industriales generan el 2.3% de las emisiones globales. Aunque como se describe en (Solórzano, 2003) se ha identificado que CH₄ "puede ser 21 veces más potente que el CO₂ como atrapador de calor". Por lo que, en conjunto, los costos y la disponibilidad energética, junto con los problemas asociados a su generación y distribución, están impulsando a nuevas formas de encontrar un desarrollo sustentable.

Gráfico 1 Emisiones GEI en México



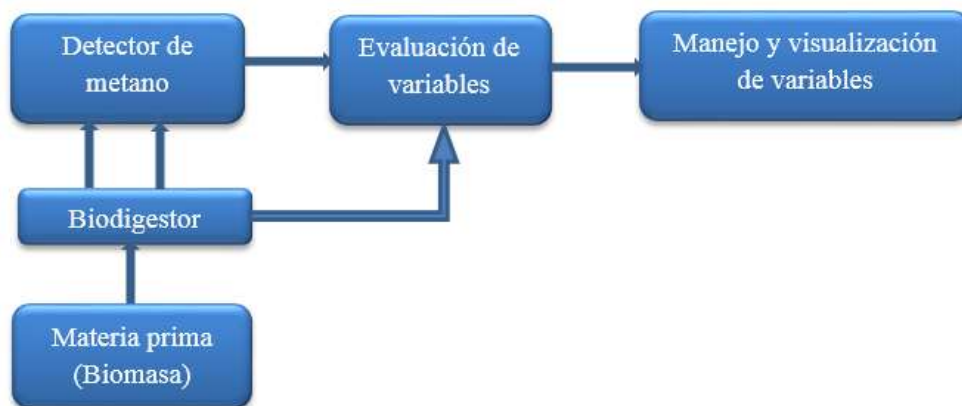
Fuente: Elaboración propia, con base en cifras de Ge et al. (2021)

En cuanto a las posibles soluciones para disminuir la contribución de los GEI al calentamiento global existen iniciativas para aprovechar y dar tratamiento a los residuos residenciales así mismo como a los de la agricultura para la generación de biogás como un sustento energético. De esta manera, se aborda un doble propósito que por un lado busca generar un sistema alternativo de energía y por otro lado pretende servir como una medida auxiliar el de tratamiento de residuos generados por la actividad y consumo de la humanidad, ya que a partir de la biodigestión de residuos orgánicos se puede obtener biogás, y gas de síntesis por medio la gasificación de la biomasa.

No obstante, para producir biogás se deben tomar en cuenta diversos factores que contribuye o modifican el proceso de la biodigestión, como la concentración de CH_4 , ya que el biogás es una mezcla compuesta principalmente por CH_4 (50%-70%) y CO_2 (25%-40%) y otras cantidades mínimas de gases, por ejemplo, ácido sulfhídrico (H_2S) en 1% (Coto, 2007). No obstante, la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada en su generación. En este sentido, este trabajo propone diseñar y construir un prototipo que permita detectar la presencia de CH_4 y cuantificar la concentración de distintas mezclas en un proceso de biodigestión para determinar la combinación que genera mayor producción de biogás a partir de los residuos generados por tres tipos de mezclas que consideran 1) desechos de comida y/o residenciales; 2) desechos de madera y excrementos de bovinos y 3) plantas y hojarascas secas. La metodología consistió en elaborar diferentes experimentos para evaluar rendimiento de biogás en cada una de las biomásas seleccionadas. En la Figura 1 se muestra un diagrama a bloques general de la propuesta abordada.

A continuación, en las siguientes secciones se presenta una introducción a la biomasa y el proceso de biodigestión, posteriormente se describe el diseño del sistema propuesto y por último se validan los alcances del trabajo mostrando el desarrollo de pruebas y resultados obtenidos.

Figura 1 Diagrama a bloques general de la propuesta



Fuente: Elaboración Propia

2. La biomasa y el proceso de biodigestión

La biomasa es una fuente primaria de energía no convencional que se clasifica dentro de las energías renovables. Se origina a partir de un proceso biológico (producto de materia orgánica), fotosíntesis (producto de materia vegetal) y también como resultado organismo heterótrofos y puede variar según su origen y el tipo de residuo en biomasa natural, biomasa residual y cultivos energéticos (Feijoo y Villacreses, 2020).

La energía química contenida en la biomasa puede ser aprovechada directamente mediante su combustión, gasificación o pirolisis en el estado sólido; o bien a través de la obtención y combustión de biocombustibles gaseosos o líquidos. Dependiendo del grado de procesamiento se pueden clasificar como:

- Biocombustibles sólidos (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales, pellets, briquetas): pueden quemarse directamente o previa gasificación o pirolisis, para producir calor y electricidad.
- Biocombustibles líquidos (bioetanol, biodiesel y bioturbosina): obtenidos de cultivos energéticos como caña de azúcar y oleaginosas o de aceite vegetal usado, grasas animales y otras fuentes.
- Biocombustibles gaseosos (biogás, biometano): obtenidos de los residuos municipales y estiércol; pueden generar calor y electricidad, localmente y en sistemas interconectados.

Tabla 4 Tipos de biomasa

Origen	Fuente	
Animal residual	Residuos de paja, aserrín, estiércol, ganaderos, basura urbana.	Lodo, estiércol bovino, vacuno, entre otros.
Natural	Biomasa seca	Madera, leña, podas de frutales, pasto, residuos forestales, restos de las industrias madereras y del mueble.
	Biomasa húmeda	Residuos de la fabricación de aceites, lodo, residuos ganaderos.
Vegetal residual	Agrícolas	Girasol, maíz, cebada, caña de azúcar.
Cultivos energéticos	Plantaciones generadas exclusivamente para su transformación y aprovechamiento energético	Cardo, Girasol, entre otros.

Fuente: Elaboración propia, con base en cifras de Friedrich y Vigna (2021)

De acuerdo a Macera *et al.*, (2011) las bioenergéticas (o biocombustibles) se pueden clasificar de acuerdo a las tecnologías empleadas para su generación como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de los bioenergéticos con base en sus diferentes generaciones tecnológicas

Bioenergéticas	Sólidos	Líquidos	Gaseosos
1ra generación	Leña, carbón vegetal, bagazo, pellets	Bioetanol, biodiesel, licor negro	Biogás, gas de síntesis
2da generación	Biochar, torrefactos, torpellets	Etanol celulósico, syndiésel, aceite de pirolisis	Biometano
3ra generación		Diésel de algas, etanol de algas	Biohidrógeno

Fuente: Elaboración propia, con base en Masera *et al.*, (2011)

Básicamente, el biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano CH₄, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. En la Tabla 3 se muestran los principales parámetros de interés que se deben acotar cuando se manipula este gas (Moreno, 2011). Estos parámetros servirán como base para el análisis del detector de metano en conjunto con los equipos y dispositivos necesarios para su monitoreo como los sensores, ya que estos parámetros son necesarios para la evaluación de la concentración, límite de explosión, temperatura de ignición, presión crítica, entre otros del metano para su uso en el proceso de generación de energía.

En México, existe una organización que rige y regula todos los parámetros de seguridad y manejo de productos derivados del gas natural. Dentro de estas normas predominan dos las cuales abordan el uso y manejo del CH₄ para generación de energía, la primera es la Norma oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010 Especificaciones del gas natural (Diario Oficial de la Federación [DOF-1], 2010) y segunda es la Norma oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010 Especificaciones del gas natural (Diario Oficial de la Federación [DOF-2], 2010).

La NOM-001-SECRE-2010 tiene como finalidad establecer las especificaciones que debe cumplir el gas natural que se maneje en los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución de gas natural, para preservar la seguridad de las personas, medio ambiente e instalaciones de los permisionarios y de los usuarios. Por otro lado, la NOM-002-SECRE-2010 establece los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplirse en el diseño, materiales, construcción, instalación, pruebas de hermeticidad, operación, mantenimiento y seguridad de las instalaciones de aprovechamiento de gas natural.

Tabla 3 Características generales del biogás

Composición	5 - 70% CH ₄ 30 - 45% CO ₂ Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 - 6.5 kWh
Equivalente de combustible	0.60 - 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 - 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750 °C
Presión crítica	74 - 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg
Olor	Olor Putrefacto (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kgmol ⁻¹

Fuente: (Moreno, 2011)

Tal y como lo estipula la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), para controlar y eficientizar los procesos de digestión anaeróbica de la materia orgánica y producir biogás se utilizan biodigestores. Estos son reactores diseñados para el manejo de residuos en donde se descomponen y se les trata mediante digestión anaeróbica.

En el proceso de digestión anaeróbica en un biodigestor con producción de biogás se pueden identificar tres etapas que ocurren simultáneamente: 1) la hidrólisis, 2) la acidogénesis y acetogénesis, y 3) la metanogénesis. En la etapa 1, la materia orgánica considerada compleja se degrada por la acción de microorganismo en materia orgánica soluble generando sustratos. En la etapa 2 se procesa la materia orgánica soluble y se libera hidrógeno molecular (H₂), CO₂ y acetato (CH₃COO⁻). En la etapa 3, la metabolización acetoclástica transforma el ácido acético en CH₄ y CO₂, y la metabolización hidrogenotrófica permite que a partir del H₂ y el CO₂ se genera el CH₄ (Largo, 2021).

Por otro lado, los biodigestores pueden tener tecnologías muy variadas, por lo que existe una amplia clasificación de biodigestores según la materia prima a degradar y el proceso. Por lo que la elección del tipo de biodigestor que se puede utilizar la producción de biogás depende en gran medida de la zona en la que se desea implementar, de la tecnología y de la materia prima (FAO, 2019). Dentro de los biodigestores más comunes se encuentran los: 1) continuos de una etapa; 2) continuos de dos etapas y 3) discontinuos o en *batch*. En los biodigestores de una sola etapa las reacciones bioquímicas ocurren dentro del biodigestor, la carga de alimentación es continua y existen líneas de entrada y salida para el proceso. El 95% de las plantas que se encuentran reportadas para producción de biogás vía proceso de digestión anaeróbica emplean este sistema ya que su diseño y costo de construcción es económico (Arhoun, 2017). Por otro lado, en los sistemas continuos de dos etapas, el proceso de digestión anaeróbica se da en biodigestores separados (Borja & Rincón, 2017). En cuanto a los discontinuos, estos se alimentan utilizando mezclas de materia orgánica y agua, dejando que ocurra un proceso de fermentación para posteriormente analizar el rendimiento del biogás (Nuntón, 2018).

Existe una diversidad de análisis tanto físicos como químicos que se pueden realizar en sustratos y materiales en el proceso de biodigestión para cualificar y cuantificar el proceso de producción, el rendimiento y la eficiencia en la producción de biogás. De acuerdo a FAO (2019) entre las variables más importantes a monitorear se encuentran la temperatura y el tiempo de retención hidráulica. La temperatura influye en el proceso de la digestión anaerobia, ya que los microorganismos pueden trabajar en tres diferentes rangos: psicrófilos (menos de 25°C), mesófilos (entre 25 y 40°C) y termófilos (entre 40 y 55°C). Para un mismo material y en un mismo lapso de tiempo se producirá más biogás a temperaturas termofílicas que a temperaturas psicrófilas. El tiempo de retención relaciona el volumen del biodigestor y la velocidad de flujo de la carga de alimentación, es decir, permite definir el número de días en que se lleva a cabo el proceso de biodigestión, en función al crecimiento de la población microbiana y la bioconversión de los sustratos. Por otro lado, el tiempo de retención depende de factores como la biodegradabilidad del sustrato y las condiciones operacionales del proceso, siendo una de las más importantes la temperatura de reacción. A temperaturas mesófilas, el tiempo de retención hidráulica se da de 14 a 40 días, a diferencia del rango termofílico que se da de 14 a 20 días, es decir que a mayores temperaturas es más rápida la velocidad del proceso de digestión anaerobia obteniendo un mayor rendimiento de biogás (Srisowmeya, Chakravarthy & Nandhini, 2019).

3. Diseño del biodigestor

Para el proceso de biodigestión anaeróbica en esta propuesta se identifican cuatro fases: 1) diseño del tanque-contenedor, 2) diseño de la lógica de control, 3) almacenamiento de residuos finales y 4) se establecen los productos finales. A continuación, se describen cada uno de estos procesos con mayor detalle.

El diseño del biodigestor propuesto en este trabajo se basa en la configuración cónica, como el mostrado en la Figura 2, identificando las 8 secciones marcadas como se recomienda en (Eutotubo, 2020). Para su construcción se definen los parámetros mostrados en la Tabla 4.

Figura 2 Biodigestor de base cónica



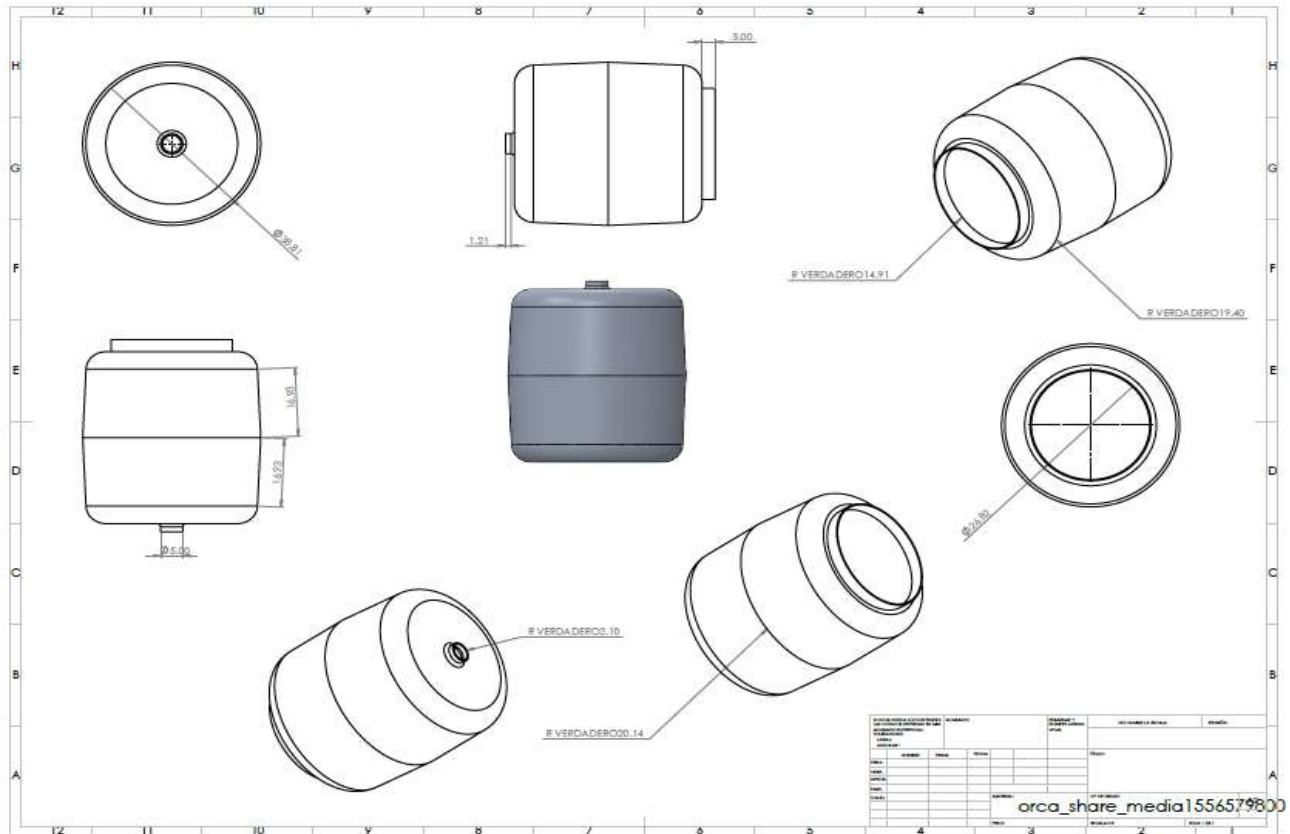
Fuente: Adaptado de Eurotubo [imagen], por los autores, 2021, Eurotubo (<https://eurotubo.com.pe/>)

Tabla 4 Características del biodigestor

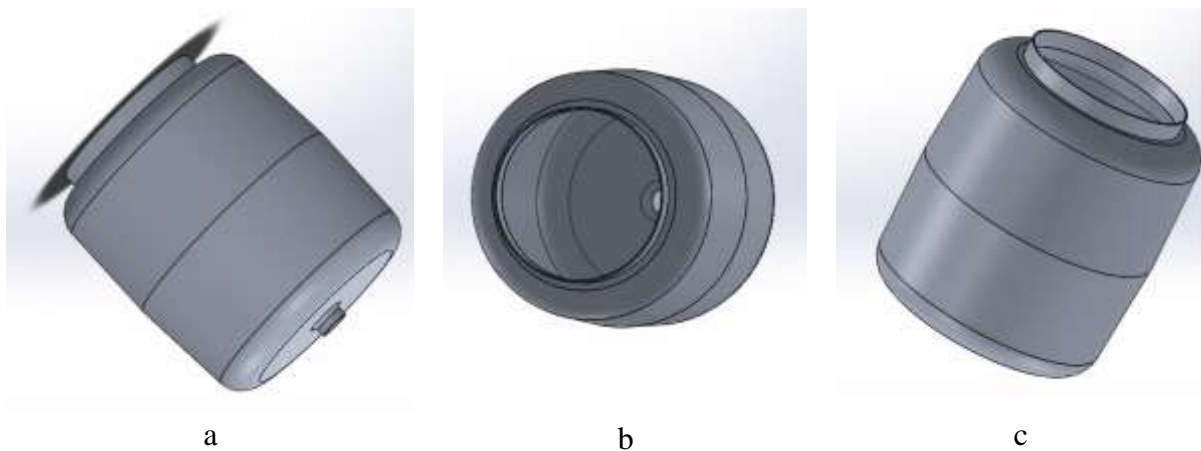
Características	Mezcla
Contenedor	Tanque cilíndrico o rectangular por sobre/debajo del nivel del suelo de 20 kg
Tecnología	Media
Requerimientos caloríficos adicionales	Si
Sólidos totales	3 - 10 % 2 - 3 kg
HRT (días)	15+
Clima optimo	Todos
Líquidos totales	4 - 5 % 1 - 1.5 L

Fuente: Elaboración Propia

Estos tipos de biodigestores son tanques que se instalan por debajo o sobre el suelo, diseñados para tratar residuos con una concentración de sólidos entre el 2.5 % y el 10%. Estas estructuras requieren de una menor superficie, pero necesitan trabajar a una mayor temperatura, por lo que es necesario brindarles una fuente de calor, la estructura suele construirse por sobre o debajo del suelo y los principales materiales pueden ser concreto, acero o fibroglas. Siguiendo las especificaciones y requerimientos necesarios para la generación de biogás a partir de la biomasa, se diseña el tanque-contenedor para el biodigestor partiendo de un tanque de gas de 20 kg, como se muestra en la Figura 3. En la Figura 4 se muestran las vistas inferior, frontal y superior.

Figura 3 Diseño de la tanque-contenedor para el biodigestor

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4 Vistas del tanque-contenedor: (a) inferior, (b) frontal y (c) superior en 3D

a

b

c

Fuente: Elaboración Propia

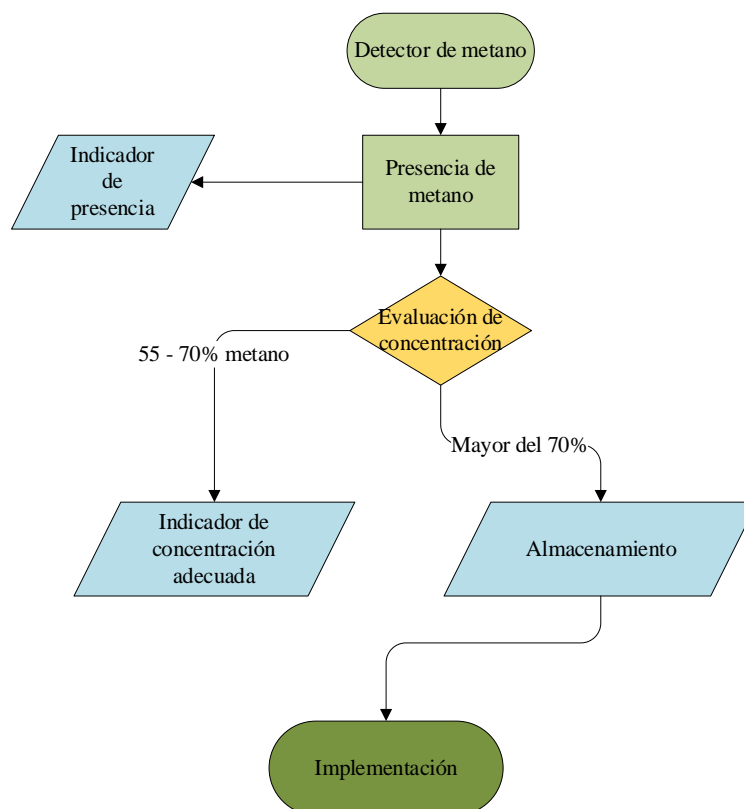
En el tanque-contenedor mostrado en las Figuras 3 y 4, la abertura superior circular que funge como la entrada de los sólidos, se puede observar que la salida inferior es más pequeña para fungir con un drenaje de los productos acuosos generados por la descomposición ya que el producto para el proceso de biodigestión debe estar a un 60 % seco para cumplir con los requisitos de generación, las dimensiones del tanque-contenedor adoptado a partir del modelo de un biodigestor cónico se diseñó para cumplir con las especificaciones mostradas en la Tabla 4, las medidas del tanque contenedor son 55 cm de alto por 24 cm de ancho y 2100 cm de diámetro. Para la construcción se seleccionan los materiales mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5 Materiales seleccionados para el tanque-contenedor del biodigestor

Material
Placa de acrílico de 30 cm x 25.5 cm con 12 mm de espesor
Empaques de plástico vulcanizado de 40 cm
Tubería de cobre para gas
Tornillería
Malla de acero

Fuente: Elaboración Propia

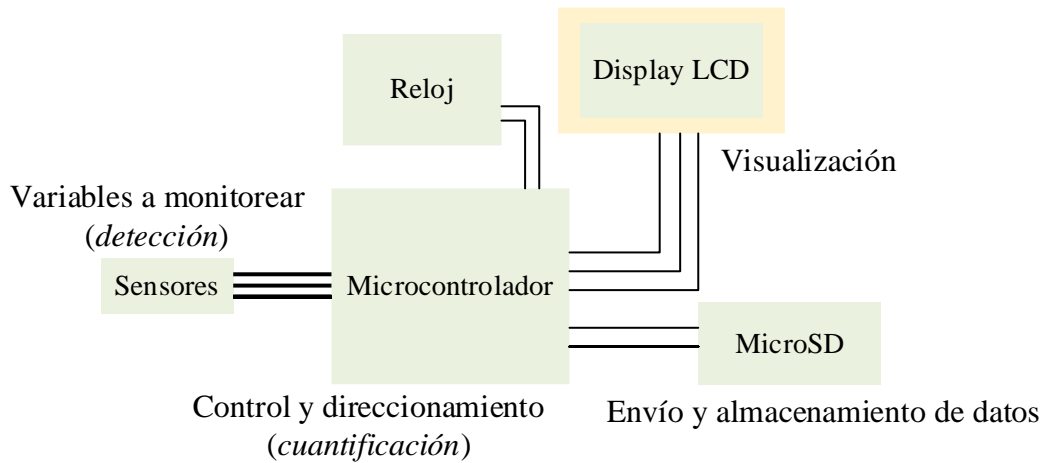
Para el monitoreo y análisis es necesario contar con datos de: presión, temperatura, detección y concentración de CH_4 , por lo que se propone el esquema mostrado en la Figura 5. El flujo inicia con una lectura de la presencia de CH_4 , la cual al dar positiva encenderá un led indicador con descripción “Presencia de metano” y se evalúa la concentración. Si la concentración está en el rango de 55-75 %, el dispositivo encenderá un indicador con descripción “Concentración adecuada”, en caso contrario el sistema realizará una segunda evaluación iniciando y así sucesivamente hasta cumplir con la condición. Si la concentración es mayor al 70 % entonces se realiza el almacenamiento. Una vez analizados todos los parámetros anteriores y validados, se procederá al almacenamiento y cuantificación de generación.

Figura 5 Lógica de funcionamiento para el monitoreo y detección en el proceso de biodigestión

Fuente: Elaboración Propia

Para detectar la presencia de CH_4 se utiliza el sensor MQ-4 y para la presión del gas se utiliza el manómetro REGU-1/4 que mide una presión máxima de 160 psi y tiene un diámetro de 5 cm. Los datos leídos son cuantificados en función a la concentración de CH_4 en el microcontrolador PIC18F4550. Además, se incluye en el sistema una pantalla LCD para mostrar las lecturas de las condiciones del biodigestor como la mostrada en la Figura 6. En la pantalla se pueden visualizar los valores instantáneos registrados por los sensores, tales como: presencia del gas, concentración del gas, fecha y hora del día. Complementando con puerto USB y adaptador Micro SD para el almacenamiento de datos e historial del censado del mismo. El sistema cuenta con un conector tipo USB 2.0 el cual se conecta directamente con el micro controlador, el conector USB se encarga de mandar toda la información necesaria de calibración de los sensores, así como los datos del controlador, que es el encargado de procesar todos los datos recabados por los sensores y de darles el formato necesario para que se puedan su visualizar en la pantalla LCD.

Figura 6 Diagrama a bloques del esquema de monitoreo y control para el biodigestor



Fuente: Elaboración Propia

4. Desarrollo de pruebas y resultados

Para el desarrollo de pruebas es importante definir y delimitar las variables que influyen en el proceso por lo que a continuación se definen estos parámetros.

- Temperatura: Como en la mayoría de las reacciones orgánicas, la temperatura afecta la velocidad de la misma. A mayor temperatura, mayor será la actividad biológica. Se han distinguido dos rangos de temperaturas considerados como óptimos para la producción del CH₄. Aunque el CH₄ se puede producir a temperaturas menores de incluso 10 °C, es preferible, para conseguir niveles de reacción adecuados, trabajar siempre a temperaturas mayores a los 20 °C.
- Mezclado: El mezclado sirve para lograr condiciones ambientales homogéneas. De no producirse una mezcla adecuada, se pueden desarrollar microambientes dentro del ambiente. En la medida en que se logre una distribución adecuada, se evitarán altas concentraciones de productos metabólicos intermedios que pueden llegar a inhibir la actividad de las bacterias metalogénicas.
- Tiempo de retención de sólidos: El tiempo de retención de sólidos es el período que una partícula se queda en el biodigestor. En el proceso de crecimiento en suspensión, el TRS es igual para todas las partículas. Sin embargo, en otros tipos de procesos, el TRS puede diferir.
- Tiempo de retención hidráulico: El tiempo de retención hidráulico es la variable más importante en los biodigestores. Este tiempo, que depende de las características de los residuos tratados y las condiciones medioambientales, debe ser lo suficientemente largo como para permitir que las bacterias anaeróbicas metabolicen dentro de los digestores. El tiempo de retención puede ser distinto dependiendo de las condiciones en las que se encuentre dando como estimado de 5 a 15 días.

Las pruebas se realizaron en un periodo promedio de 6 meses, evaluando tres mezclas denominadas consecutivamente como mezcla 1 a 3. Cada una de las mezclas se evaluó por un periodo de dos meses. Para calcular la producción óptima de metano, se utiliza el modelo de Chen y Hashimoto, una adaptación del modelo cinético de Contois (Fuentes, 2011). En este modelo, se parte de la relación volumétrica de metano como se muestra en la Ecuación (1).

$$V = \frac{B_0 \times S_0}{HRT} \times \left[1 - \frac{K}{HRT \times \mu_m - 1 + K} \right] \quad (1)$$

Donde:

V es la relación volumétrica de metano $\left[\frac{m^3}{m^3 \text{ día}} \right]$

HRT es el tiempo de retención hidráulica [días]

B_0 es la producción máxima de metano cuando HRT tiende a infinito $[\frac{m^3}{kg}]$; esta variable dependerá del tipo de residuo del que se trate.

S_0 es la concentración en volumen de sólidos volátiles del efluente entrante $[\frac{kg}{m^3}]$

K es un parámetro cinético adimensional

μ_m es la tasa específica máxima de crecimiento de un organismo $[\frac{1}{días}]$

La relación volumétrica de metano establece cuántos metros cúbicos de metano se pueden obtener por día por metro cúbico del biodigestor.

S_0 se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$S_0 = \frac{SV_e}{E_e} \quad (2)$$

Donde SV_e $[\frac{kg}{día}]$ la masa de sólidos volátiles SV $[kg]$ que ingresa por día y E_e es el volumen del efluente entrante diario que contiene dicha masa $[\frac{m^3}{día}]$.

La masa de sólidos volátiles SV se puede calcular mediante:

$$SV = ST \times r_{TV} \quad (3)$$

Donde ST es la masa de sólidos totales $[kg]$ y r_{TV} es la relación porcentual entre la masa de sólidos volátiles y la masa de sólidos totales $\frac{SV}{ST}$ de la biomasa. A su vez, ST se puede calcular con:

$$ST = SS \times r_{ST} \quad (4)$$

Donde SS es la biomasa $[kg]$ y r_{ST} es la relación porcentual entre la masa de sólidos totales y la masa de desechos orgánicos $\frac{ST}{SS}$. Por lo tanto, SV se puede calcular mediante:

$$SV = SS \times r_{ST} \times r_{TV} \quad (5)$$

La variable K es un parámetro cinético adimensional y está determinado por:

$$K = 0.8 + 0.0016xe^{0.06 \times S_0} \quad (6)$$

Para $K \leq 1.64$ de acuerdo a (Fuentes, 2011)

μ_m es la tasa específica máxima de crecimiento de un organismo $[\frac{1}{días}]$; y viene dado por:

$$\mu_m = 0.013 \times T - 0.129 \quad (7)$$

Donde T es la temperatura de funcionamiento del biodigestor $[°C]$.

Por su parte, la producción diaria de metano V_{CH_4} $[\frac{m^3}{día}]$ se puede expresar mediante:

$$V_{CH_4} = V_d \times \quad (8)$$

Donde V_d es el volumen del biodigestor $[m^3]$.

Prototipo experimental

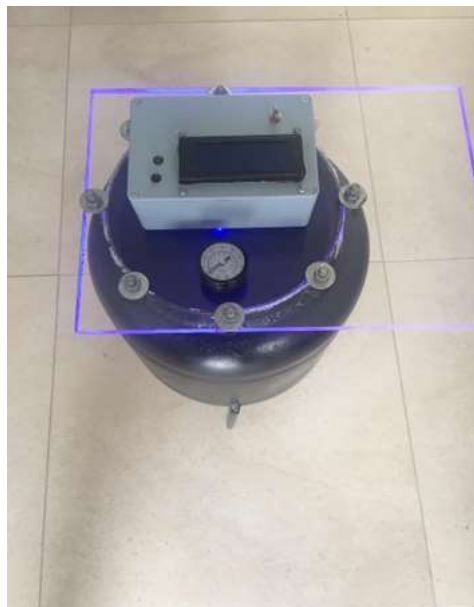
A continuación, se describen las especificaciones y composición de las mezclas. Así como el proceso de montaje del banco de pruebas. En las Figura 7 se muestra el preensamble del tanque-contenedor para el biodigestor, posteriormente en las Figuras 8, 9 y 19 se muestran el biodigestor ensamblado y verifican las medidas de construcción propuestas con el diámetro y la altura, respectivamente. En la Figura 11 se muestra la vista superior.

Figura 7 Preensamble del tanque-contenedor para el biodigestor



Fuente: Elaboración Propia

Figura 8 Biodigestor ensamblado



Fuente: Elaboración Propia

Figura 9 Vista lateral del biodigestor y verificación de diámetro



Fuente: Elaboración Propia

Figura 10 Vista lateral del biodigestor y verificación de altura



Fuente: Elaboración Propia

Figura 11 Vista superior del biodigestor ensamblado



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se documentan los resultados obtenidos para cada una de las mezclas evaluadas.

Mezcla 1: Desechos de comida y/o residenciales

La mezcla 1 se elaboró con residuos de comidas y desperdicios domésticos los cuales se proporcionaron de una recolecta de residuos por la colonia para la elaboración de la mezcla, compuesta por los siguientes residuos. Conformando 1 kg de mezcla.

Tabla 6 Materiales seleccionados para el tanque-contenedor del biodigestor

Tipos de residuos	Cantidad
Desechos de alimentos: comida, tortillas, frutos, verduras, etc.	70 %
Cascaras, semillas, cereales y productos enlatados caducados	30 %

Fuente: Elaboración Propia

Para calcular el porcentaje de concentración de CH₄ es necesario tomar como referencia la cantidad de partes por millón (PPM) para que el gas contenido en el prototipo sea inflamable y cumpla las características del proyecto. Las PPM necesarias para que el gas sea inflamable son 1800 (REF). Para calcular el porcentaje se utiliza la Ecuación 9. En la Tabla 7 se muestran los resultados de los datos recopilados.

$$\% = \frac{PPM * 100}{PPM REF} \quad (9)$$

Tabla 7 Composición de la mezcla 1

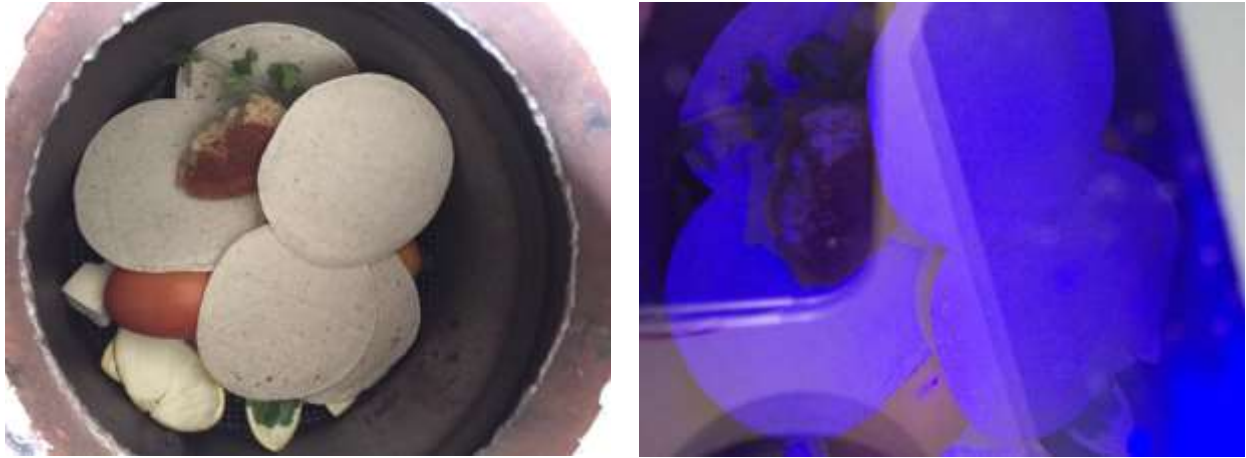
Mes	Datos			
	Semana	CH4 (PPM)	CH4 %	Temperatura °C
Enero	1	86	5	28
	2	251	13.90	30
	3	475	26.38	32
	4	683	37.94	36
Febrero	5	790	43.88	38
	6	970	53.88	40
	7	1046	58.11	40
	8	1300	72.22	41

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 12 se puede observar la composición de la mezcla 1, la cual en su mayoría es de residuos de comida y vegetales. En la Figura 13 se muestran las lecturas mínima y máxima registradas por el biodigestor con el prototipo experimental para la mezcla 1.

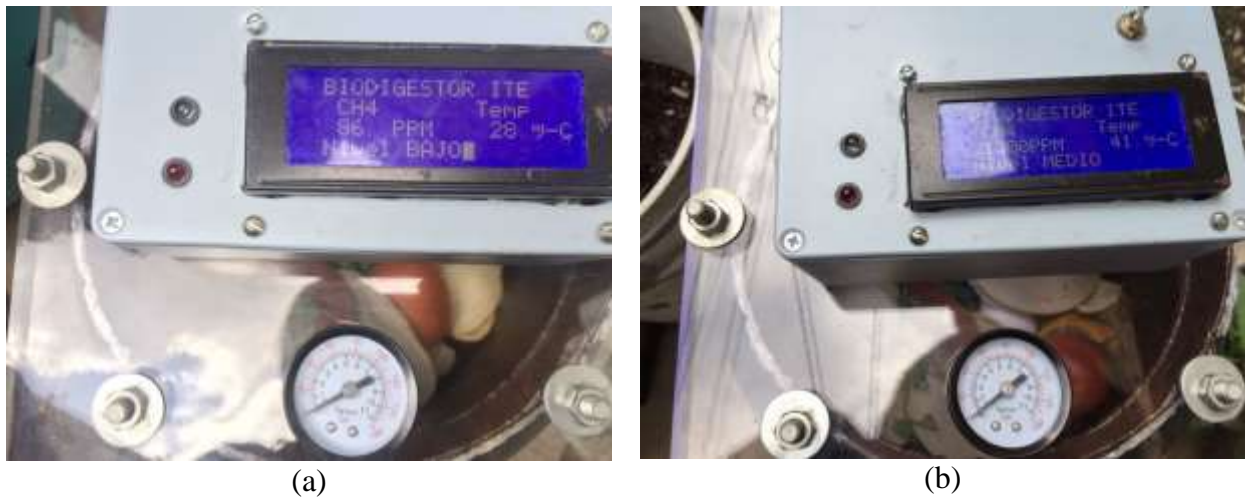
En la Gráfica 2 se muestra la variación de la concentración de CH₄ por semana, se puede observar que el comportamiento muestra una tendencia lineal. Por otro lado, en la Gráfica 3 se muestra el porcentaje de producción por semana. Se puede observar que el comportamiento es consistente con las PPM registradas. Por último, en el Gráfico 4 se muestra la relación de comportamiento para los datos mostrados en la Tabla 7.

Figura 12 Composición de la mezcla 1



Fuente: Elaboración Propia

Figura 13 Lecturas registradas para la mezcla 1: (a) mínima, (b) máxima

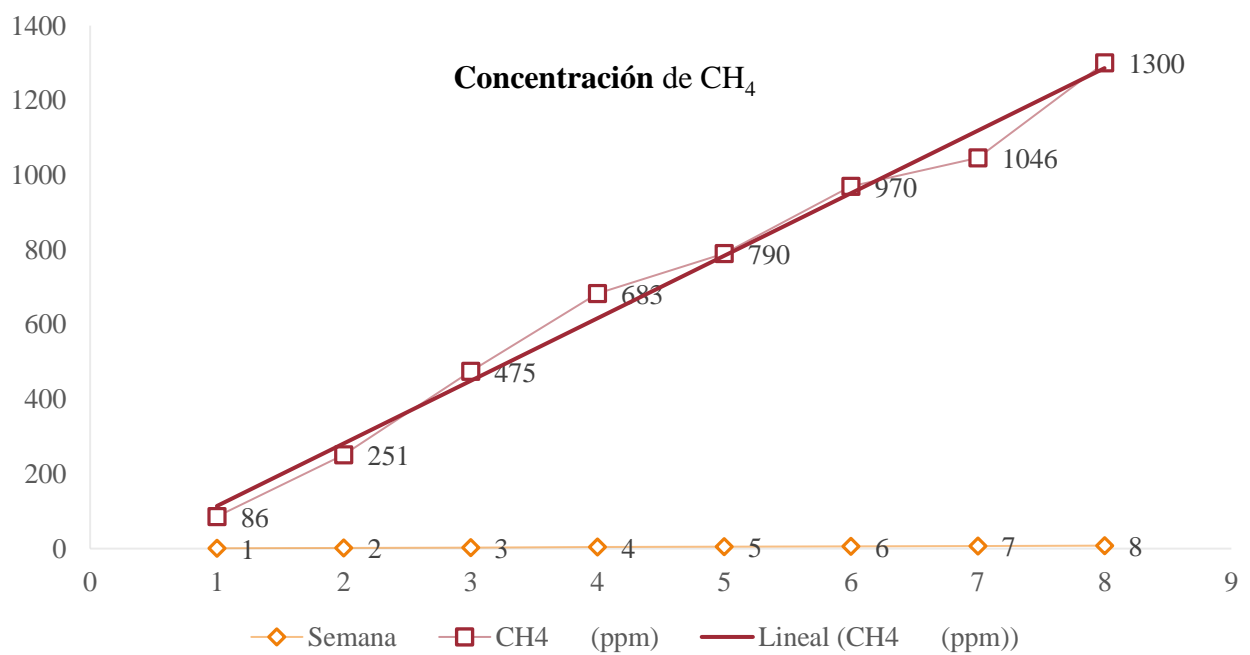


(a)

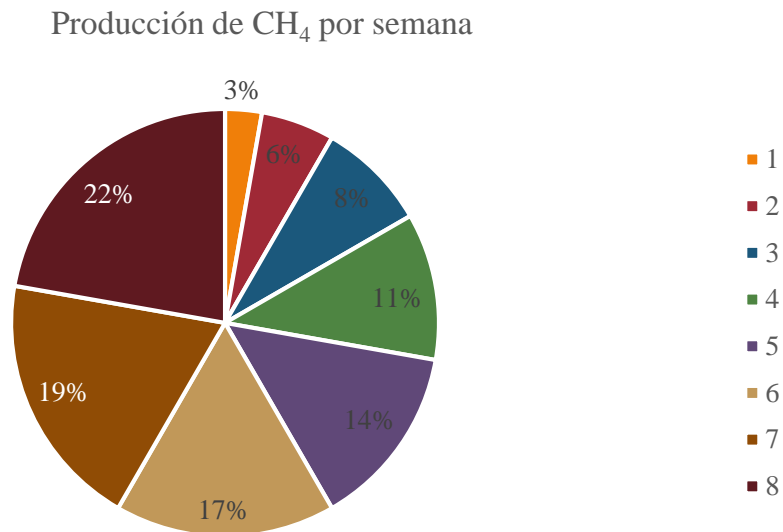
(b)

Fuente: Elaboración Propia

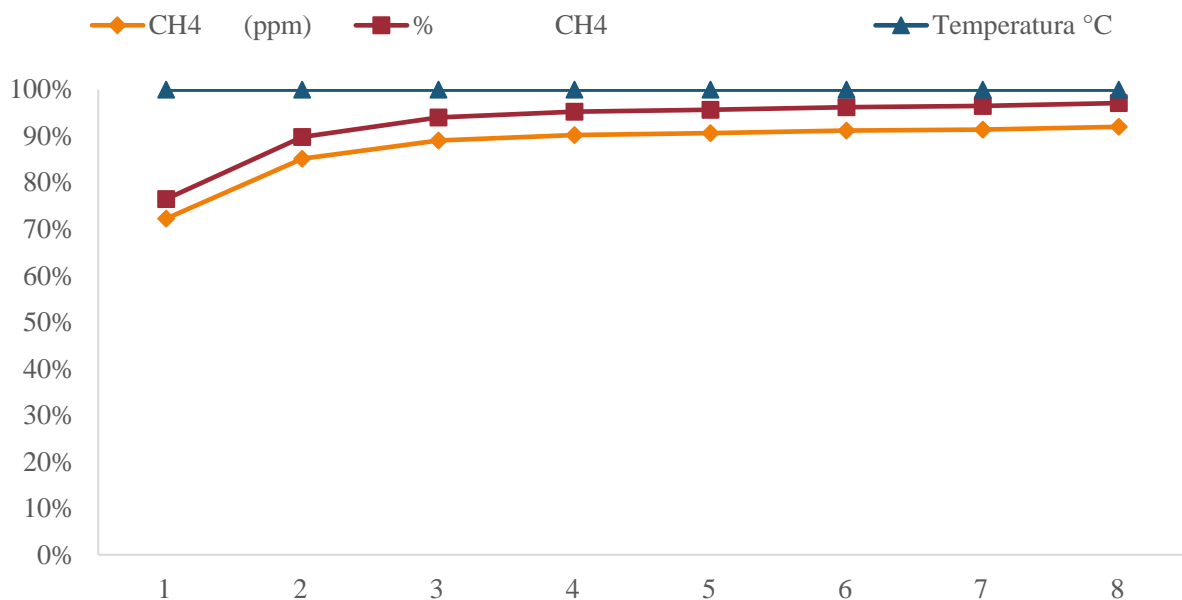
Gráfico 2 Comportamiento de la concentración de CH₄ para la mezcla 1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3 Porcentaje de CH₄ producido por semana para la mezcla 1

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 4 Porcentaje de CH₄ para la mezcla 1 por semana

Fuente: Elaboración Propia

Mezcla 2: Desechos de madera y excrementos de bovinos

El material utilizado en la mezcla 2 fueron desechos de excrementos que se obtuvieron de las parcelas aledañas. Así como madera podrida recolectada y desechos que se obtuvieron de madererías. Conformando 1 kg de mezcla para la evaluación.

Tabla 8 Composición de la mezcla 2

Tipos de residuos	Cantidad
Desechos de animales: excremento bovino	85 %
Maderas podridas y desechos de madererías	15 %

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 9 se muestran los datos registrados para la mezcla por el lapso de 2 meses.

Tabla 9 Datos recopilados para la mezcla 2

Mes	Datos			
	Semana	CH4 (PPM) (PPM)	CH4 %	Temperatura °C
Marzo	1	100	6	32
	2	179	9.94	32
	3	348	19.33	36
	4	573	31.83	39
Abril	5	813	45.16	42
	6	1078	59.88	40
	7	1346	74.77	42
	8	1689	93.88	40

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 14 se puede observar la composición de la mezcla 2. En la Figura 15 se muestran las lecturas mínima y máxima registradas por el biodigestor con el prototipo experimental para la mezcla 2. Se destaca una generación de CH₄ mucho más elevada que la presentada por la mezcla 1.

Figura 14 Composición de la mezcla 2



Fuente: Elaboración Propia

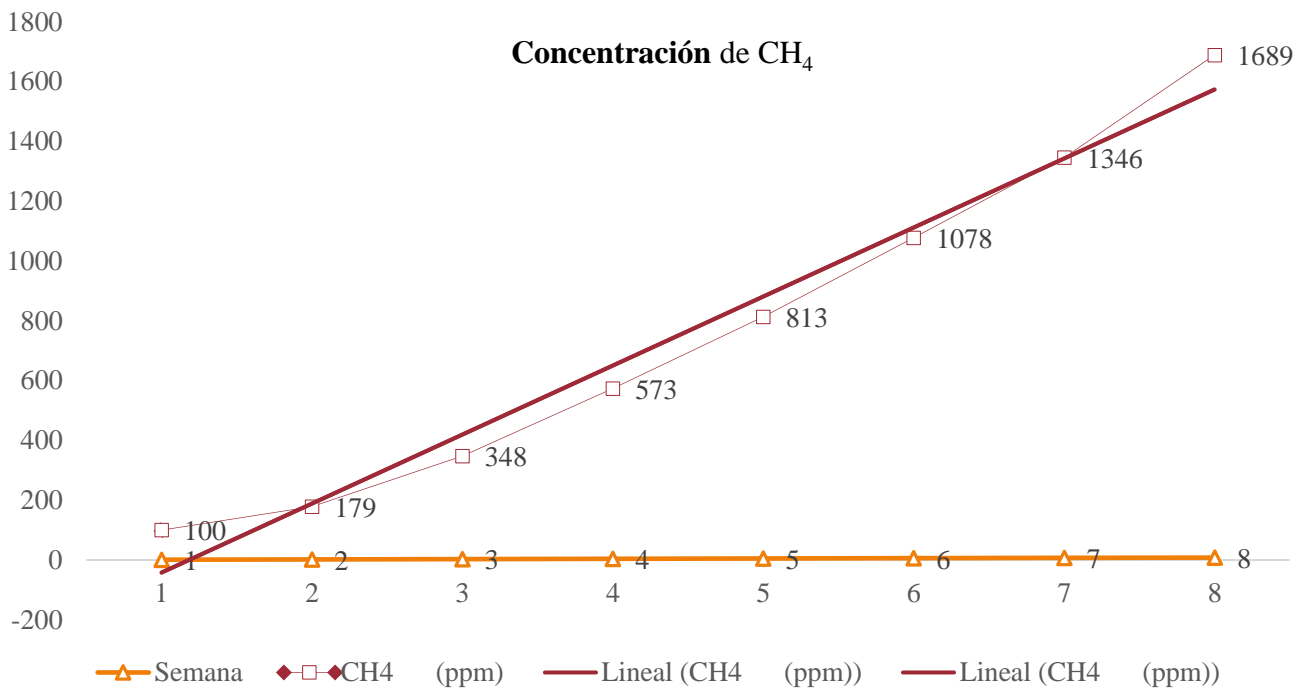
Figura 15 Lecturas registradas para la mezcla 2: (a) mínima, (b) máxima.



Fuente: Elaboración Propia

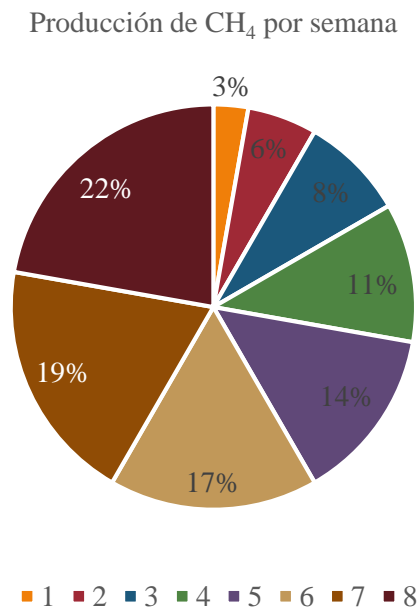
En la Gráfica 5 se muestra la variación de la concentración de CH₄ por semana, se puede observar que el comportamiento muestra una tendencia lineal. Por otro lado, en la Gráfica 6 se muestra el porcentaje de producción por semana. Se puede observar que el comportamiento es consistente con las PPM registradas. Por último, en el Gráfico 7 se muestra la relación de comportamiento para los datos mostrados en la Tabla 9.

Gráfico 5 Comportamiento de la concentración de CH₄ para la mezcla 1

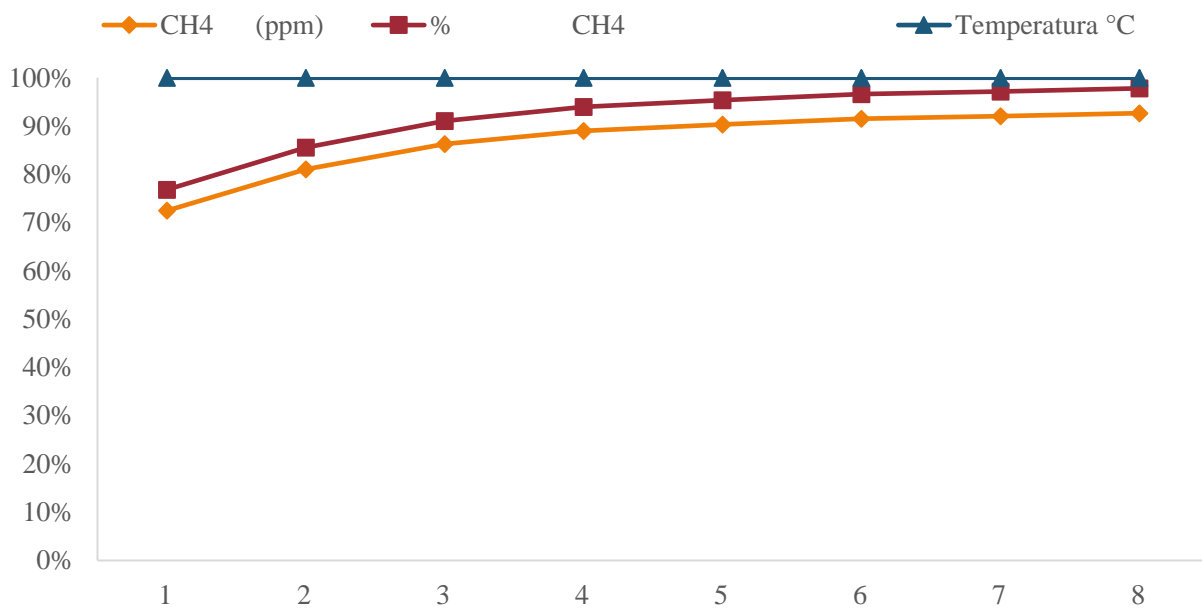


Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 6 Porcentaje de CH₄ producido por semana para la mezcla 2



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 7 Porcentaje de CH₄ para la mezcla 2 por semana

Fuente: Elaboración Propia

Mezcla 3: Plantas y hojarascas secas

Para la mezcla 3 se recolectaron plantas y hojarascas secas productos de los desechos de abonos naturales como árboles, plantas secas encontradas en los campos cercanos aledaños en los campos de cultivo para conformar 1 kg de mezcla con las cantidades mostradas en la tabla 10.

Tabla 10 Composición de la mezcla 3

Tipos de residuos	Cantidad
Desechos de plantas: pasto, arboles, maleza	55 %
Hojarascas secas, plantas secas	45 %

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 11 se muestran los datos registrados para la mezcla por el lapso de 2 meses.

Tabla 11 Datos recopilados para la mezcla 3

Mes	Datos			
	Semana	CH4 (PPM) (PPM)	CH4 %	Temperatura °C
Mayo	1	14	1	28
	2	27	1.50	28
	3	46	2.55	30
	4	62	3.44	32
Junio	5	148	8.22	34
	6	194	10.77	34
	7	221	12.72	36
	8	300	16.66	36

Fuente: Elaboración Propia

Para introducir la mezcla 3 en el biodigestor fue necesario pulverizar la madera en trozos pequeños para homogenizar la mezcla y balancear los componentes del producto. En la Figura 16 se muestra la mezcla 3 se encuentra dentro del prototipo lista para su descomposición En la Figura 17 se muestran las lecturas mínima y máxima registradas por el biodigestor con el prototipo experimental para la mezcla 3.

Figura 16 Composición de la mezcla 3

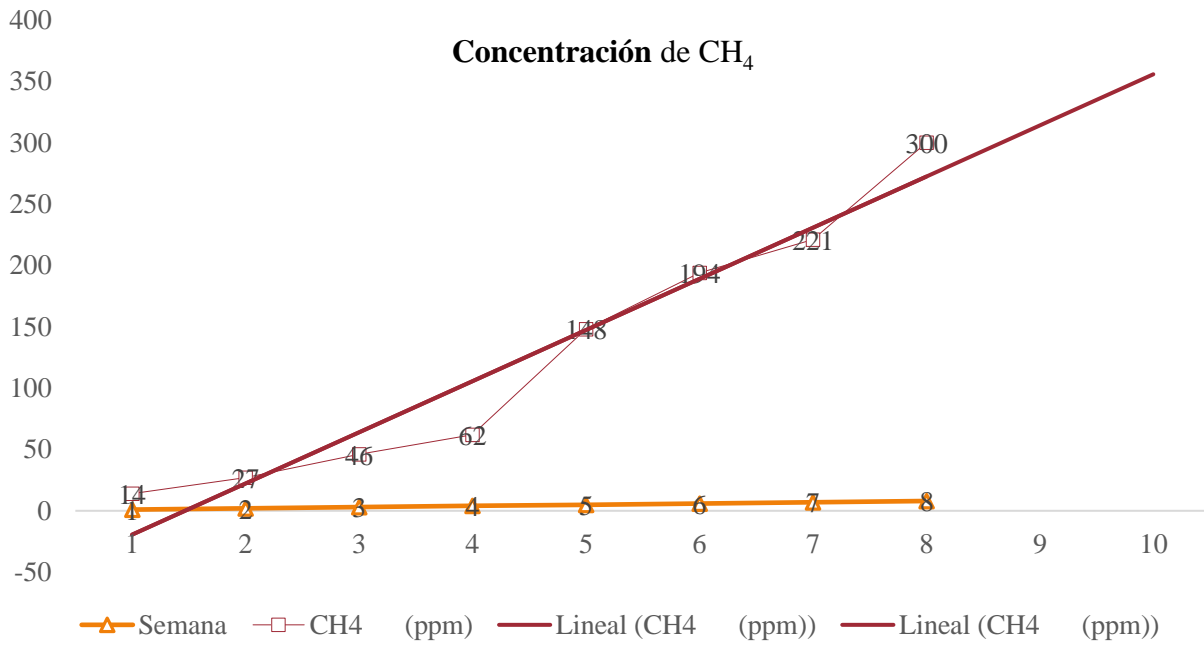
Fuente: Elaboración Propia

Figura 17 Lecturas registradas para la mezcla 3: (a) mínima, (b) máxima.

Fuente: Elaboración Propia

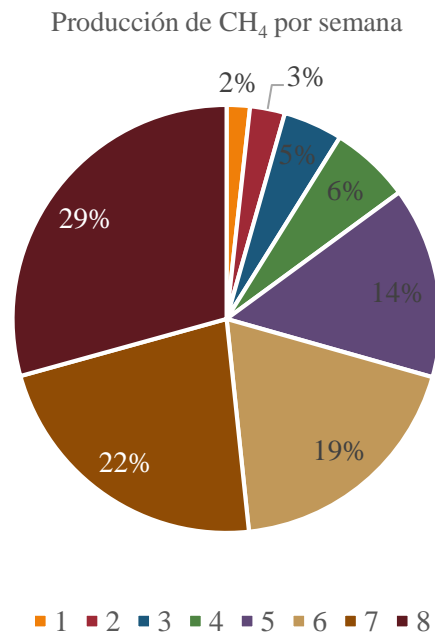
En la Gráfica 8 se muestra la variación de la concentración de CH_4 por semana, se puede observar que el comportamiento muestra una tendencia lineal. Por otro lado, en la Gráfica 9 se muestra el porcentaje de producción por semana. Se puede observar que el comportamiento es consistente con las PPM registradas. Por último, en el Gráfico 10 se muestra la relación de comportamiento para los datos mostrados en la Tabla 11. Se puede observar que la mezcla 3 presenta una menor producción de CH_4 en el periodo evaluado. Por último, en el Gráfico 11 se muestra una comparativa de la producción entre las tres mezclas evaluadas. Se puede identificar a partir de los resultados que la mezcla 2 es la que genero una mayor concentración en la producción de CH_4 .

Gráfico 8 Comportamiento de la concentración de CH₄ para la mezcla 1



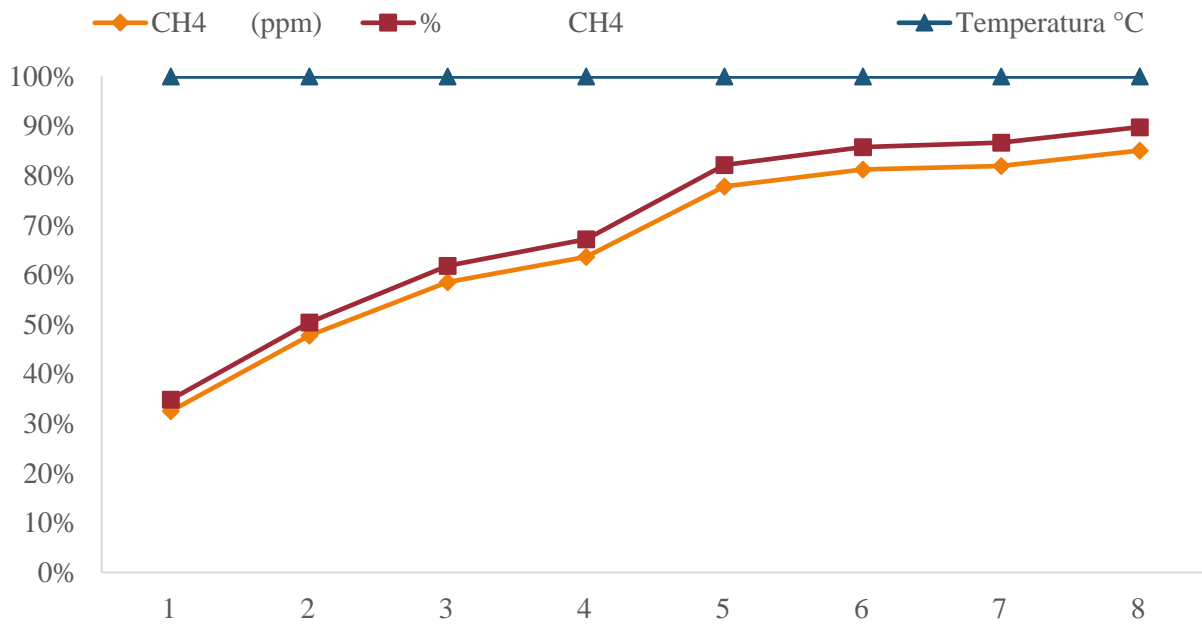
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 9 Porcentaje de CH₄ producido por semana para la mezcla 3



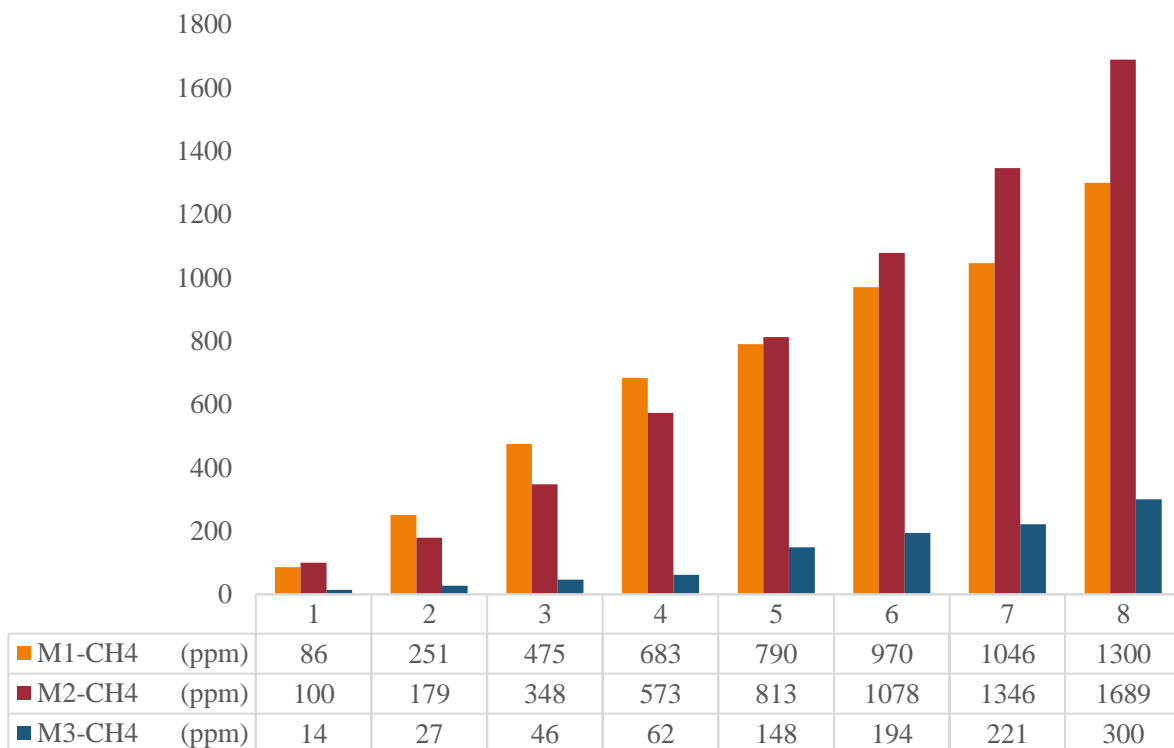
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 10 Porcentaje de CH₄ para la mezcla 3 por semana



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 11 Comportamiento de la producción de CH₄ en PPM para las distintas mezclas evaluadas en las semanas 1 a 8



Fuente: Elaboración Propia

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso diseñar y construir un prototipo experimental para un biodigestor con el objetivo de cuantificar la presencia de CH₄ y determinar la concentración para distintas mezclas en un proceso de biodigestión. A partir de los resultados obtenidos se logró obtener información relevante de los procesos de generación de biogás a partir de desechos variados combinados en tres tipos de mezclas, tomando como referencia los residuos y desechos más comunes que se puede recolectar en una comunidad.

Para la mezcla 1 se identifica que la generación de biogás es del 40% de su capacidad de combustión. En este proceso, los residuos de comidas y desechos de cascaras de fruta y vegetales generan en el proceso de descomposición desprendimiento de desechos acuosos que elevan la producción de biogás, no obstante, es importante monitorear la proliferación de hongos y bacterias que se pueden presentar. Por otro lado, para la mezcla 2 se identificó la generación de biogás en un 75% de su capacidad de combustión, lo anterior se atribuye a que los residuos de madera y excrementos bovinos, desde el proceso de asentamiento y descomposición desprenden CH₄, de acuerdo a las investigaciones realizadas se puede mencionar que esto ocurre ya que en el proceso de digestión de los bovinos los desechos son altamente ricos en bacterias que fomentan la generación de gas natural, pasado el tiempo se observa que la generación de gas no disminuye, se resalta esta característica como relevante, ya que se puede utilizar como un residuo de generación de biogás por excelencia. Finalmente, en la mezcla 3 se nota una generación por debajo de las cantidades necesarias para la combustión, lo anterior se atribuye a que los desechos de hojarasca secas y plantas de acuerdo a necesitan que el proceso de descomposición sea complementado con algún agente externo en este caso, por ejemplo, como el que se presenta en la digestión con los jugos gástricos para los bovinos y que se encuentran en el excremento. Para este trabajo, este catalizador no se incluyó por lo que no se alcanzó el nivel de combustión mínimo con la mezcla 3.

6. Referencias

- Arhoun, B. (2017). *Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Málaga]. Repositorio Institucional-Universidad de Málaga.
- Borja, R.; Rincón, B. Biogas Production. *Reference Module in Life Sciences*; 2017; pp 1–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.09105-6>.
- Coto, J. M. (2007). Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integradora de EARTH. *Tierra Tropical, Sostenibilidad, ambiente y Sociedad (Revista de la Universidad de EARTH)*, pag. 129 - 138.
- COP26. (31 de octubre). *Secure global net zero and keep 1.5 degrees within reach*. Recuperado de <https://ukcop26.org/cop26-goals/mitigation/> [Consulta: 2021, noviembre 8].
- Diario Oficial de la Federación. (2010). *DOF-1: Norma Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010*. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3997/sener/sener.htm>
- Diario Oficial de la Federación. (2010). *DOF-2: Norma Oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010*. <http://dof.gob.mx/normasOficiales/4290/sener/sener.htm>
- Eurotubo (2020). Biodigestor. Imagen tomada de: eurotubo.com.pe [Página Web en línea]. Recuperado de: <https://eurotubo.com.pe/> [Consulta: 2021, septiembre 6]
- Feijoo, V. & Villacreses, D. (2020). *Generación de gas metano mediante la codigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos y biomasa de la ciudad de Machla* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio Institucional-Universidad Técnica de Machala.
- Ge, M., Friedrich, J., y Vigna, L. (2 de septiembre de 2021). “Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector”. WRI México. <https://wrimexico.org/bloga/cuatro-gr%C3%A1ficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pa%C3%ADs-y-por-largo>, M. (2021). *Monitorización de un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales mediante narices electrónicas*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Valladolid]. Repositorio Documental-Universidad de Valladolid]
- Laureles, J. (3 de octubre de 2021). “México, uno de los 13 países mayores emisores de CO₂ del mundo: Inegycei”. La jornada. <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/10/01/sociedad/mexico-uno-de-los-13-paises-mayores-emisores-de-co2-del-mundo-inegycei/>
- Masera, C., Coralli, F., Garica, B., Riegelhaput, E., Arias, T., Vega, J., Díaz, R., Guerrero, G. & Cecotti, L. (2011). La bioenergía en México: situación actual y perspectiva. *Cuaderno temático 4*(1), 1-44.

Moreno, M. T. (2011). Manual de Biogás. Santiago, Chile: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF.

Nuntón, S. & De los Angeles, S. (2018). *Influencia de la temperatura y pH en el rendimiento de obtención de biogás a partir de bagazo de caña y estiércol de equino mediante un digestor batch* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional-Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO. (2019). “Guía teórica-práctica sobre el biogás y los biodigestores”. *Colección de documentos técnicos*, (12), 1-21.

Solorzano, G. (2003). Aportaciones de gases de efecto invernadero por el manejo de residuos sólidos en México: el caso del metano. *Gaceta ecológica*, 66(1), 7-15.

Srisowmeya, G., Chakravarthy, M. & Nandhini, G. (2019). Critical Considerations in Two Stage Anaerobic Digestion of Food Waste – A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 119(1), 1-14.