

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Producción de Biogás a Partir de Nopal, Estiércol Bovino, Porcino y Gallinaza.

TESIS

Presentada por:

NORMA ELEUTERIO GARCÍA

Como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2020.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Producción de Biogás a Partir de Nopal, Estiércol Bovino, Porcino y Gallinaza.

Por:

NORMA ELEUTERIO GARCÍA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

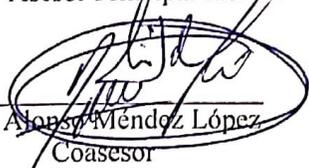
Aprobada por el Comité de Asesoría:



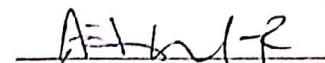
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Asesor Principal Interno



Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Asesor Principal Externo



Dr. Alonso Méndez López
Coasesor



Dra. Aida Isabel Leal Robles
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2020.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a **Dios** por guiarme, brindarme salud y fortaleza para cumplir uno más de mis objetivos.

A mi **Alma Mater** por brindarme un espacio para adquirir conocimiento y una serie de experiencia que me han forjado a ser mejor persona y tener amplia visión sobre el mundo profesional.

A la **Dra. Silvia Yudith Martínez Amador** asesora principal del proyecto, por su valiosa aportación y conocimiento para el desarrollo de la investigación.

A mis coacesores **Dr. Pedro Pérez Rodríguez, Dr. Alonso Méndez López, Dra. Aida Isabel Leal Robles** agradezco el apoyo para las revisiones y aportación de nuevas ideas.

A mis **compañeros** por sus enseñanzas y buenos momentos durante mi estancia en la universidad.

DEDICATORIAS

A mis padres

Les agradeceré eternamente por darme la vida, brindarme amor incondicional y apoyo para cumplir cada uno de mis sueños. La formación desde casa es de gran importancia y sin duda alguna ellos hicieron un gran trabajo por inculcarme buenos valores y hacerme fuerte para salir al mundo y superar cualquier reto.

A mis hermanos

Son compañeros de vida que comparten su tiempo y brindan apoyo cada vez que los necesito, agradezco en especial a mi hermana **Guillermina Eleuterio García** por darme ánimos para seguir adelante, por sus consejos, cariño y el apoyo incondicional, le estaré agradecida por siempre.

A mi hermana **Virginia Eleuterio García** por ser mi compañera de aventuras e impulsarme a ser mejor persona cada día, por el cariño brindado y comprensión le agradezco profundamente.

A mis abuelos

Sin duda alguna sus actos y sabios consejos me forjan cada día a ser mejor persona, les agradezco por estar ahí cada vez que lo necesito.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIAS.....	II
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
RESUMEN.....	VI
I. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Justificación.....	8
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos:.....	8
Hipótesis.....	8
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
2.1. Características generales de <i>Opuntia ficus indica</i>	9
2.1.2 Clasificación botánica y descripción de la planta.....	9
2.2 Composición química de <i>Opuntia ficus indica</i>	10
2.2.1 Cladodio.....	10
2.2.2 Fruto.....	11
2.3 Usos del nopal.....	11
III. EL NOPAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	11
IV. INÓCULOS.....	12
4.1 Biomasa.....	12
4.2 Estiércol bovino.....	12
4.2.1 Estiércol porcino.....	13
4.3 Gallinaza.....	13
V. BIOGÁS.....	14
5.1 El biogás.....	14
5.2 Composición y características del biogás.....	14
5.3 Usos del biogás.....	15
5.4 Proceso de biodigestión.....	15
VI. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	16
6.1 Fases de la digestión anaeróbica.....	16
6.1.1 Hidrólisis.....	16
6.1.2 Etapa acidogénica.....	17
6.1.3 Etapa acetogénica.....	17
6.1.4 Etapa metanogénica.....	17

VII.	PARÁMETROS QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	18
	<i>pH: neutralidad y alcalinidad</i>	18
	<i>Efecto de la temperatura</i>	18
	<i>Relación C/N</i>	18
	<i>Nutrientes</i>	19
	<i>Agitación</i>	19
VIII.	MATERIALES Y METODOS	20
	8.1 Ubicación del experimento	20
	8.2 Materiales	20
	8.3 Metodología	20
	Preparación de la mezcla:	21
	Perforación de la tapa del frasco:	22
	Implementación del biodigestor:	22
	Toma de datos:	23
IX.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
X.	28
XI.	CONCLUSIONES	29
XII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación taxonómica de <i>opuntia ficus indica</i>	10
Tabla 2. Composición del biogás.....	15
Tabla 3. Volumen de biogás generado por día en mililitros.....	25
Tabla 4. Propiedades físicas y químicas de las diferentes fuentes de animales.....	27
Tabla 5. Caracterización fisicoquímica del nopal.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Preparación del sustrato.....	21
Figura 2. Mezcla del nopal e inóculo.....	21
Figura 3. Biodigestores conectados al sistema para medir volumen de biogás generado. ...	22
Figura 4. Volumen de biogás acumulado.	24

RESUMEN

La presente investigación se llevó a cabo en el laboratorio de Biotecnología en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila. El objetivo de este experimento fue determinar el volumen de biogás que se produjo en la digestión anaerobia de nopal con tres diferentes inóculos (estiércol bovino, porcino y gallinaza). El nopal fue colectado en San Felipe del Progreso Estado de México y los inóculos fueron colectados en las Unidades Experimentales de esta Institución.

Se establecieron 3 tratamientos con 3 repeticiones, cada tratamiento fue alimentado con 60 gramos de nopal, 20 g de estiércol y 100ml de agua. Para medir el volumen de biogás generado se utilizó el método volumétrico el cual consiste en medir el desplazamiento de agua contenida en una probeta ocasionado por el biogás formado. La toma de datos se realizó durante 33 días teniendo como resultado una mayor producción de biogás acumulado con el tratamiento de nopal con gallinaza con una producción acumulada de biogás de 54 L seguido de los tratamientos con estiércol porcino con 51 L y bovino con 27L.

I. INTRODUCCIÓN

El género *Opuntia* es la especie cactácea de mayor importancia económica en el mundo debido a su riqueza de especies, composición química y adaptabilidad para crecer en ambientes muy secos (Peña, 2008). El nopal es considerado como cultivo alternativo en las regiones semiáridas debido a la tolerancia a la sequía y variedad de uso como: fruta, verdura, forraje, medicinal y fuente bioenergética. El nopal está asociado a un tipo de vegetación denominado matorral xerófilo cuya vegetación tolera escasas de agua y altas temperaturas (Gallegos, 2011).

En nuestro país el cultivo de nopal se desarrolla en los estados de México, Puebla, San Luis Potosí, Jalisco, Hidalgo, Tlaxcala, Oaxaca, Distrito Federal, Zacatecas, Aguascalientes, Morelos, Guanajuato, siendo el estado de Morelos el primer productor de esta cactácea después del Estado de México y Zacatecas (SAGARPA, 2016). En estas entidades se tiene una superficie establecida con nopaleras de 53 mil 303 hectáreas, en las que se obtiene una cosecha anual de 344 mil toneladas de nopal verdulero y tuna, cuyo valor total, entre verdura y fruta, se calcula en 990 millones de pesos (SAGARPA, 2011).

El nopal tiene varias aplicaciones de valor comercial en México las que destacan son la producción de nopal para verdura, tuna, forraje y grana cochinilla. Dentro de tantas aplicaciones el nopal se utiliza como reserva en tierras áridas y semiáridas ya que pueden mejorar las propiedades del suelo, prevenir la erosión y rehabilitar las regiones secas degradadas.

Alternativamente se han planteado proyectos para la obtención de biogás como fuente de energía alternativa a partir de las pencas de nopal que quedan como desecho después de la cosecha de la grana cochinilla (Arreguín, 2016).

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha trabajado ampliamente en la búsqueda y evaluación de las fuentes de energía renovables. En 2010 se iniciaron trabajos para determinar la factibilidad de producción de biogás a partir del nopal que constituye una opción energética viable, ya que de sus tallos y frutos es posible obtener biogás, biodiesel y bioetanol o productos semiterminados que pueden ser empleados directamente.

1.1. Justificación

Tras la búsqueda de recursos energéticos menos contaminantes y renovables se considera al nopal una fuente de gran importancia ya que de ella en combinación con estiércol se generan varios beneficios tales como la producción de biogás, fertilizantes y electricidad. El uso del nopal se considera una fuente muy viable y sustentable para la producción de biogás ya que durante el proceso de biodigestión no genera contaminación y todos los residuos generados durante su procesamiento tienen un uso de gran valor.

Se sabe que conforme pasa el tiempo, el costo y la demanda de energía y combustibles aumentan considerablemente, factor por el cual se deben generar nuevas alternativas para el desarrollo de técnicas para producir energías limpias donde el costo de producción no sea tan elevado.

La producción de biogás es una alternativa que trae consigo grandes beneficios a los diferentes productores de nopal y a la comunidad en general, porque se generan empleos en la zona rural debido a la alta producción de nopal y el establecimiento de un biodigestor donde se llevará a cabo el proceso que requiere la transformación de la biomasa y el sustrato a biogás.

Objetivo general

Determinar el volumen de biogás generado a partir de la biodigestión de nopal con diferentes inóculos.

Objetivos específicos:

Establecer la técnica utilizada para separar y cuantificar el volumen del biogás.

Evaluar el efecto que produce la temperatura durante el proceso de biodigestión.

Determinar el efecto de los inóculos en la producción de biogás.

Hipótesis

La biodigestión de la mezcla de nopal con gallinaza será el tratamiento con mayor producción de biogás debido a que este inóculo tiene una gran diversidad de microorganismos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Características generales de *Opuntia ficus indica*

2.1.1 *Opuntia ficus indica*

La familia de las Cactáceas está constituida por 2000 especies, siendo México el principal centro de diversificación de la familia con aproximadamente 850 especies. Los nopales pertenecen al género *Opuntia* donde se reconocen actualmente 190 especies de las cuales 83 se localizan en México. Con respecto al área cultivada de nopal existe alrededor de 50,000 ha de plantaciones para el consumo humano y animal (García, 2011).

Opuntia ficus indica es una planta perteneciente a la familia de las Cactáceas que se adapta a condiciones restringidas de zonas áridas y semiáridas. El nopal crece en suelos arenosos, calcáreos, pedregosos y en tierras marginales y poco fértiles. Estas plantas absorben y almacenan la mayor cantidad de agua durante la temporada de lluvias, la cual es relativamente corta en las zonas donde se desarrollan (Terán *et al.*, 2015).

2.1.2 Clasificación botánica y descripción de la planta

Son plantas perennes, suculentas, generalmente son arbustivas o rastreras, la gran mayoría espinosas. Los nopales tienen un tronco bien definido o ramificado desde la base, con ramas erguidas, extendidas o postradas. *Opuntia* está formado por pencas llamadas cladodios que pueden ser globosos, cilíndricos o aplanados, carnosos o leñosos, son de color verde que realizan funciones fotosintéticas (Cervantes, 2006).

El fruto usualmente es turbinado, algunas veces esférico, cilíndrico o elíptico, frecuentemente amarillo brillante, amarillo pálido a rojo púrpura, menos frecuentemente en combinación de amarillo/verde o amarillo/rojo; la pulpa del mismo color que el de la cáscara, pero frecuentemente de un color contrastante, pulposo y jugoso, de ligeramente a muy dulce (Reyes *et al.*, 2005).

Tabla 1. Clasificación taxonómica de *Opuntia ficus indica* (García-Osuna, 2013).

Reino	Plantae
División	Angiosperma
Clase	Dicotiledónea
Orden	Opuntiales
Familia	Cactácea
Género	<i>Opuntia</i>
Especie	<i>ficus indica</i>

2.2 Composición química de *Opuntia ficus indica*

El conocimiento de la composición química de cada parte de esta planta es requerido para la caracterización de ésta en la producción de biogás y el tratamiento a seguir para llegar a un biodigestor. Esta composición varía a medida que crece la planta, ya sea disminuyendo o aumentando la cantidad de un componente establecido.

2.2.1 Cladodio

El cladodio presenta el mayor contenido de agua cuando se encuentra en su etapa juvenil, sin embargo, en el transcurso de su crecimiento el contenido de agua en él varía entre un 88% a un 91%. El contenido de materia seca aumenta con el crecimiento de la planta, teniendo los porcentajes más bajos cuando son cladodios jóvenes, no obstante, a esa edad presentan a la vez los niveles de proteínas más alto. Esta última, junto con la grasa, la fibra gruesa y las cenizas son parte del contenido de materia seca del cladodio, el cual fluctúa entre 9% a 12% en su total. El porcentaje promedio de proteínas presentes es aproximadamente de 4%, el de grasa es de 1,8%, el de fibra gruesa es de 9,2%, aumentando junto con la edad del cladodio y por último el porcentaje promedio de cenizas es aproximadamente 18%, el cual disminuye a medida que va creciendo la planta (Sáenz, 2006).

Por otro lado, en la composición mineral del cladodio destaca el calcio presente con un 9,5%, aumentando en conjunto con la edad del cladodio. Otros minerales acentuados son el fósforo cuyo porcentaje en el cladodio es de 0,21%, el de sodio es de 0,05% y del potasio es 1%.

2.2.2 Fruto

El fruto del nopal se divide en tres componentes que pueden explotarse comercialmente: semillas, cáscara y pulpa. Esta fruta contiene aproximadamente 85% de agua, 15% de azúcar, 0.3% de ceniza y menos de 1% de proteína (Cota, 2016).

Los sólidos solubles aumentan a medida que crece el fruto, al igual que la vitamina C, no así la acidez, la cual permanece constante al avanzar la madurez, con un valor de 6,0 aproximadamente. El alto contenido de sólidos solubles y del pH hace que prevalezca el crecimiento de microorganismos en la pulpa. Los contenidos de proteínas varían entre 0,21 a 1,6%, el de grasa es de 0,09 a 0,7%, el de fibra es de 0,02 a 3,15% y finalmente el de ceniza es de 0,4 a 1% (Sáenz, 2006).

2.3 Usos del nopal

Tanto las variedades espinosas como no espinosas de *Opuntia ficus-indica* se usan ampliamente como fuente de alimento, forraje y para producir tintes. Los frutos se comercializan ampliamente en muchas partes del mundo, se comen crudos y tienen una de las concentraciones más altas de vitamina C de cualquier fruta. En gran parte de América los cladodios tiernos se comercializan para el consumo humano. Hoy en la actualidad *Opuntia ficus-indica* constituye una fuente de gran importancia para la producción de energía renovables (Andrade *et al.*, 2006).

La fabricación de productos elaborados con nopal ha aumentado debido al incremento considerable de la demanda, debido al auge de los patrones naturistas de consumo (Morán, 2013).

III. EL NOPAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

En la actualidad a través del desarrollo de tecnologías más avanzadas y eficientes, así como de la infraestructura y equipo, la biomasa del nopal representa una fuente renovable de gran potencial, con la capacidad de brindar biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser utilizados en la producción de calor, electricidad y combustibles para el transporte, los cuales tienen la particularidad de ser de autoconsumo y de manera descentralizada (Jesús, 2010).

El nopal representa una opción energética viable para la producción de biogás y energía eléctrica comparándolo con la *Jatropha*. Como referencia una hectárea de nopal produce 43.200 m³ de biogás o bien el equivalente en términos de energía a 25,000 litros de diésel, al comparado con *Jatropha* que únicamente produce 3,000 litros de biodiesel por hectárea. dejando muy claramente que además es un cultivo muy versátil y de bajo costo. La alta densidad de plantación y su alta productividad (1000 ton/ha/año) permiten competir con otras energías renovables y no requerir subsidios (Wayland, 2010).

IV. INÓCULOS

4.1 Biomasa

La biomasa abreviatura de masa biológica, es una cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico. El término es utilizado con mayor frecuencia en las discusiones relativas a la energía de biomasa, es decir, al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa que procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en desarrollo y la cual se desarrolla más a detalle en el siguiente apartado.

4.2 Estiércol bovino

El estiércol de vaca (heces) es material vegetal indigerible liberado en el suelo desde el intestino de una vaca. Es un material de gran utilidad y nos ayuda de una o varias formas ya que es considerado como un recurso abundante y renovable (Crampton, 2017). Este tipo de estiércol no es tan rico en nitrógeno como muchos otros, los altos niveles de amoníaco pueden quemar las plantas cuando el estiércol fresco se aplica directamente. El estiércol del ganado se compone básicamente de hierba y grano digeridos. El estiércol de vaca es alto en materiales orgánicos y rico en nutrientes. Contiene alrededor de 3 por ciento de nitrógeno, 2 por ciento de fósforo y 1 por ciento de potasio (Tilley, 2016).

El estiércol está conformado por materia orgánica que contiene energía que puede ser liberada por bacterias en forma de metano que es la base del gas natural comprimido. El

estiércol de las vacas se puede fermentar con la ayuda de bacterias. Este proceso produce biogás y tiene lugar en un digestor anaeróbico. El digestor se llena con estiércol de vaca a diario. En promedio, el estiércol permanece en el digestor durante aproximadamente 60 días, durante los cuales la mayor parte del material orgánico se convierte en biogás.

Aplicación del estiércol bovino para la producción de biogás

El estiércol puede ser una fuente de energía alternativa para los ganaderos. Un digestor anaeróbico convertirá parcialmente el estiércol en energía en forma de biogás que contiene metano (entre otros gases).

4.2.1 Estiércol porcino

La porcicultura es una actividad muy productiva y cada día tiene mayor auge, sin embargo, genera grandes cantidades de desechos sólidos y líquidos, los cuales al ser depositados directamente al suelo sin recibir tratamiento previo provocan impactos orgánicos y biológicos (Córdoba, 2011).

4.3 Gallinaza

La gallinaza es el resultado de la acumulación de excreta, plumas y alimento desperdiciado sobre un material usado como cama. La cantidad de gallinaza excretada y las características de la gallinaza dependen de la especie, la edad, la dieta y la salud de las aves, así como de las prácticas de gestión agrícola que se apliquen antes y durante el manejo de esta (Córdoba & Miño, 2015).

Los nutrientes que se encuentran en la gallinaza se deben a que las gallinas solo asimilan entre el 30% y 40% de los nutrientes con las que se les alimenta, lo que hace que en su estiércol se encuentren el restante 60% a 70% no asimilado. El estiércol de gallina contiene un importante nivel de nitrógeno el cual es imprescindible para que tanto animales y plantas asimilen otros nutrientes y formen proteínas y se absorba la energía en la célula.

La gallinaza posee un alto contenido de humedad y altos niveles de nitrógeno, que se volatilizan velozmente, creando fuertes y malos olores, perdiendo calidad como fertilizante.

La gallinaza contiene todos los nutrientes básicos necesarios para el desarrollo de los vegetales, entre los cuales se encuentran: carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio, magnesio, boro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc (Montesde Oca & Salazar, 2017).

La gallinaza como cualquier otro desecho orgánico, puede ser tratado con biodigestores lo que acelera el proceso de descomposición y hace más efectiva la transformación de sus elementos lo que en el proceso genera biogás. Es un perfecto sustituto del gas propano. La instalación de plantas productoras de biogás a partir de desechos orgánicos, entre los cuales se puede considerar el estiércol de gallina, es viable e incluso rentable (Seclen, 2015).

V. BIOGÁS

5.1 El biogás

Se da este nombre a la mezcla gaseosa producida por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. La composición típica del biogás en alta proporción corresponde al metano (CH₄), un gas combustible que permite la utilización de este producto para fines energéticos. El metano (CH₄) proporciona un poder energético más elevado y por tanto es el componente de mayor interés (Navarro, 2016).

Algo característico de las comunidades rurales es que disponen de grandes cantidades de desechos que provienen de actividades agrícolas y pecuarias. El estiércol de los animales, las cascaras de las frutas, hojas, residuos de la cocina y cualquier material orgánico pueden ser convertidos en energía y en abono que retorna a la tierra de donde se obtuvo la materia orgánica (Corona, 2007).

5.2 Composición y características del biogás

El biogás, es un gas combustible que se genera artificialmente, en dispositivos específicos, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas), en ausencia de aire (ambiente anaeróbico). Cuando la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno, actúa este tipo de bacterias, generando biogás. De modo natural se produce en la putrefacción

de materia orgánica y es conocido como gas de pantano o gas natural (Corona, 2007). El biogás está constituido fundamentalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), otros componentes minoritarios son el ácido sulfhídrico (H₂S), el amoníaco (NH₃), el nitrógeno (N₂), el oxígeno (O₂), el hidrógeno (H₂) y el agua (H₂O). Su composición, de estos y otros gases, depende de la biomasa de partida a parte de otros factores. Dependiendo del sustrato orgánico del que proceda y de las características de las instalaciones de producción (Graña, 2015).

Tabla 2. Composición del biogás (Lugones 2011).

Gas	Contenido %
Metano	54-70
Dióxido de carbono	27-45
Nitrógeno	0.5-3
Hidrogeno	1-10
Monóxido de carbono	0.10
Oxígeno	0.10
Sulfuro de hidrógeno	0.15

5.3 Usos del biogás

El buen funcionamiento de los sistemas de biogás puede producir una amplia gama de beneficios para sus usuarios, la sociedad y el medio ambiente en general: producción de energía (calor, luz, electricidad), transforma los residuos orgánicos en abono de alta calidad, ventajas medioambientales mediante la protección del suelo, agua, aire y la vegetación leñosa, fuentes de ingresos y aumentar los rendimientos de la ganadería y la agricultura (Villanueva *et al*, 2011).

5.4 Proceso de biodigestión

La biodigestión es un proceso en el cual la materia orgánica es degradada por influencia de la actividad de microorganismos, originando un gas, el cual está constituido por metano, dióxido de carbono y otras trazas.

Para que el proceso de biodigestión se lleve a cabo se requieren ciertas condiciones entre las cuales se puede mencionar: la temperatura y el pH, ambas están muy relacionada a los

procesos microbiológicos ya que depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos. Mientras que de la segunda depende el desarrollo de los microorganismos en su medio, y la composición del biogás producido. Por otro lado, existe una variable a la salida del biodigestor requerida para la combustión, la cual es la presión, También existen otros factores determinantes en la biodigestión como: naturaleza y composición bioquímica de la materia prima, relación carbono/nitrógeno de las materias primas, niveles de sólidos totales y sólidos volátiles, tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica (López *et al.*, 2016).

VI. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia de la materia orgánica es un proceso complejo, que incluye un número de pasos de degradación diferentes, los microorganismos que participan en el proceso son específicos para cada etapa de degradación y por tanto tienen diferentes requisitos ambientales (Khalid *et al.*, 2011). Dentro de los principales factores que afectan el proceso se encuentran el tamaño de las partículas a digerir, las características del sustrato y el inóculo y factores ambientales como temperatura, pH, alcalinidad (total y bicarbonática) y AGV's (Verma, 2002).

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí. La cantidad de gas producido es muy variable, aunque generalmente oscila alrededor de los 350 l/kg de sólidos degradables, con un contenido en metano del 70 % (Lorenzo *et al.*, 2005).

6.1 Fases de la digestión anaeróbica

6.1.1 Hidrólisis

La hidrólisis es la primera etapa del proceso, en la cual los polímeros complejos como polisacáridos, proteínas y lípidos (grasas y aceites) son hidrolizados por acción de enzimas extracelulares convirtiéndolos en moléculas más simples y así ser disueltas por el medio acuoso que las rodea (Nayano, 2010). Las bacterias involucradas en esta fase pueden ser

anaerobias o facultativas. Este grupo que es muy numeroso se desarrolla espontáneamente en el medio cuando las condiciones son idóneas, o bien pertenecen a la flora de la sustancia orgánica a digerir (Blanco, 2011). La descomposición de la materia orgánica en la hidrólisis aumenta con la temperatura, también le favorece un menor tamaño de partícula, por lo que los tratamientos fisicoquímicos aceleran esta etapa (Bolívar, 2017).

6.1.2 Etapa acidogénica

La acidogénesis se define como un proceso anaeróbico microbiano con producción de ácido sin un donador o aceptor externo de electrones (Paucar, 2015).

En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente (Lorenzo, 2005). Esta transformación representa la actividad de tres grupos de microorganismos: Las bacterias homoacetogénicas, sintróficas y las sulfato reductoras (Ruiz, 2002).

6.1.3 Etapa acetogénica

En esta etapa unas bacterias llamadas acetogénicas convierten las moléculas orgánicas de pequeño tamaño y los ácidos grasos volátiles en ácido acético e hidrógeno (Tavizón, 2010). En esta etapa es importante la presión parcial del hidrógeno. Un contenido excesivamente alto impide la conversión de los productos intermedios de la acetogénesis por razones relacionadas con la energía. En consecuencia, se acumulan los ácidos orgánicos, como el ácido propiónico, el ácido isobutírico, el ácido isovalérico y el ácido hexanoico, e inhiben la formación de metano (Catalán, 2017).

6.1.4 Etapa metanogénica

Es la etapa final del proceso, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono (Seadi *et al.*, 2008). La formación de metano se da a partir de dos rutas principales, la primera, es la acetoclástica en la cual los microorganismos crecen principalmente en su sustrato (acetato) y la segunda, es la hidrogenotrófica en donde los microorganismos crecen en sustratos como hidrógeno y dióxido de carbono (Constanza *et al.*, 2015).

VII. PARÁMETROS QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

El proceso de fermentación anaerobia depende de diversos factores, por ejemplo: el pH, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de sustancias tóxicas, el tiempo de retención, la relación carbono: nitrógeno (C:N) y el nivel de carga (Alonso *et al.*, 2014).

pH: neutralidad y alcalinidad

El pH juega un papel importante, ya que está asociado a la ocurrencia de fenómenos de acidificación, que afectan negativamente el proceso (Torres & Pérez, 2008).

La digestión anaerobia es más eficiente a valores de pH cercanos a la neutralidad, diferentes estudios sobre la influencia del pH indican que no se puede generalizar, debido a aspectos, como las características fisicoquímicas del sustrato, que pueden aportar capacidad buffer (Dinamarca *et al.*, 2003). Cada grupo microbiano implicado en la degradación anaerobia tiene un rango de pH óptimo específico. Según Acosta & Abreu (2005), a pH entre 8.2 a 8.4 unidades, el proceso ocurre satisfactoriamente.

En cualquier caso, el pH no se considera una buena variable de control por resultar demasiado lenta. Su papel es fundamental en el equilibrio amonio - amoníaco, teniendo, por tanto, una gran importancia en el proceso general, por ser el amoníaco libre un importante inhibidor de la fase metanogénica (Campos, 2001).

Efecto de la temperatura

Este parámetro influye de manera decisiva en el proceso anaerobio, ya que de él dependen mucho las velocidades de reacción con las que se lleva a cabo cualquier proceso biológico. Se han definido dos rangos de trabajo donde puede efectuarse satisfactoriamente la digestión anaerobia ellos son los siguientes: mesofílico entre 20 y 45 °C y termofílico entre 45 y 60 °C (Acosta *et al.*, 2005).

Relación C/N

Un factor importante para la digestión es la relación C/N, es decir la cantidad de carbono dividida entre la cantidad de nitrógeno. Los alimentos principales de las bacterias anaerobias son el carbono (en forma de carbohidratos) y el nitrógeno (en proteínas, nitratos, amoníaco,

etc.) El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno para la reconstrucción de estructuras celulares. Las bacterias metabolizan el C treinta veces más rápido que el N. La digestión anaerobia, ocurre más fácilmente cuando las materias primas suministradas a las bacterias contienen proporciones de C y de N al mismo tiempo (Landeros, 2013).

Nutrientes

Los microorganismos que están involucrados en el proceso de digestión anaerobia requieren de una serie de nutrientes para su crecimiento y desarrollo de sus actividades. se puede distinguir macronutrientes como el nitrógeno, el fosforo y el azufre, mientras que entre los micronutrientes se encuentran el calcio, magnesio, sodio, hierro, potasio, níquel, cobre, así como otros compuestos orgánicos (Ramos, 2014).

Agitación

En los sistemas de tratamiento anaerobio la agitación tiene un efecto directo sobre el contacto entre la materia orgánica y los microorganismos y, en consecuencia, sobre la cinética del proceso. El sistema debe estar bien agitado y con una cierta intensidad para asegurar condiciones uniformes de parámetros tan importantes como la temperatura, el pH y la concentración de substrato (Ruiz, 2002).

VIII. MATERIALES Y METODOS

8.1 Ubicación del experimento

El proyecto se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en el laboratorio de Biotecnología ubicado en el Departamento de Botánica.

8.2 Materiales utilizados en esta investigación

Agua destilada
Agujas estériles
Estiércol bovino, porcino y gallinaza
Mangueras de 1m de largo
Mecheros
Nopal
Probetas 500 mL
Reactores de 250 mL
Soportes universales
Tapones de goma

8.3 Metodología

Se utilizó estiércol de ganado bovino, porcino y gallinaza, estos fueron colectados en las Unidades Experimentales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. El nopal se colectó en la comunidad de San Miguel la Labor, San Felipe del Progreso, Estado de México. El experimento consistió en 3 tratamientos con 3 repeticiones en los cuales se mezcló nopal: estiércol bovino, nopal: estiércol porcino, nopal: gallinaza con una relación 3:1.

Preparación de un biodigestor: se utilizaron biodigestores con capacidad de 250 mL.

Preparación del sustrato: cortar el nopal en trozos pequeños de aproximadamente 1cm para que el proceso de digestión anaeróbica sea más rápido, seguidamente mezclar con el inóculo de acuerdo con el tratamiento.



Figura 1. Preparación del sustrato.

Volumen de biogás: para la determinación del volumen de biogás utilizar el método volumétrico que consiste en el desplazamiento de agua a otro recipiente el cual indicará el volumen de biogás producido. El biogás producido se mide mediante el registro del volumen de agua desplazado en la probeta graduada (Landeros, 2013).

Preparación de la mezcla: pesar 60g de nopal. Colocar la muestra en el frasco de 250mL. Pesar 20g de estiércol bovino. Colocar la muestra dentro del frasco junto con el nopal. Agregar 100 mL de agua destilada.



Figura 2. Mezcla del nopal e inóculo.

Perforación de la tapa del frasco:

Encender un mechero de Bunsen, calentar el agitador para perforar la tapa del frasco (el diámetro de la perforación dependerá del tapón que se utilizará). Una vez perforada la tapa colocar el tapón de goma que tiene que estar a presión. Tapar el frasco que contiene la mezcla con la tapa.

Implementación del biodigestor:

Agregar 1L de agua destilada en el recipiente de plástico y colocarlo junto al soporte universal. Llenar la probeta con agua destilada, posteriormente colocar un pedazo de papel sobre la probeta para generar presión e invertirla dentro del recipiente de plástico, ajustarla al soporte universal dejando aproximadamente 1cm de altura entre la probeta y el recipiente de plástico. Colocar una de las extremidades de la manguera de 1 metro a la aguja. La extremidad de la manguera que queda libre se debe colocar cuidadosamente por debajo de la probeta a una altura de 2cm. Finalmente, la extremidad que lleva consigo la aguja se debe conectar al tapón de goma que se encuentra en la tapa del frasco con la mezcla.



Figura 3. Biodigestores conectados al sistema para medir volumen de biogás generado.

Toma de datos: realizar un registro diario del desplazamiento del agua ya que con ello se determina el volumen del biogás generado en cada reactor. Al tomar el dato del volumen desplazado, a la probeta se le volvía a añadir agua hasta el tope, de tal forma que el volumen generado por día se iba sumando.

IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este experimento se determinó la efectividad de tres inóculos para la producción de biogás a partir de nopal como sustrato.

En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos en el experimento donde se observa que la mezcla de nopal con gallinaza es el tratamiento donde se obtuvo una mayor producción de biogás acumulado con un promedio de 54 L en 36 días, seguido de porcino con 51 L y bovino con 27 L. Cabe mencionar que el volumen generado por día por repetición y tratamiento se presenta en la tabla 3.

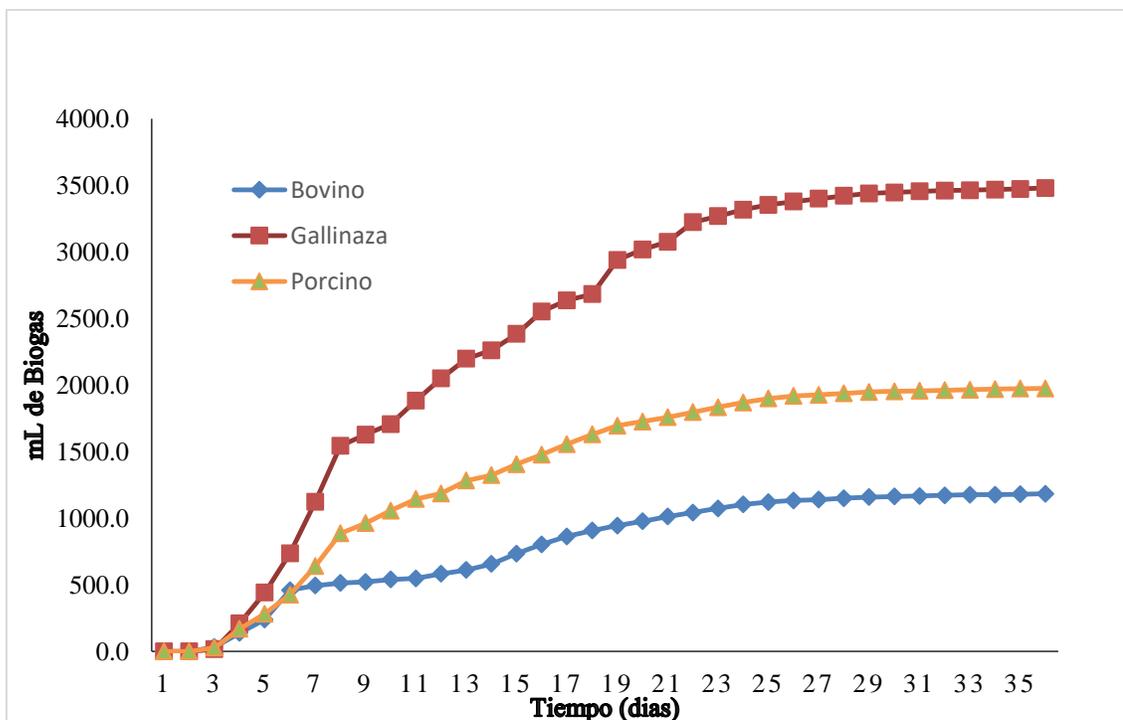


Figura 4. Volumen de biogás acumulado.

Tabla 3. Volumen de biogás generado por día en mililitros.

DIA	Bovino			Gallinaza			Porcino		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	20	40	40	15	15	20	35	25	25
4	100	190	125	165	190	280	135	200	175
5	220	320	180	385	490	450	255	335	260
6	440	610	330	750	730	730	495	455	330
7	490	640	355	1150	1110	1110	775	695	450
8	510	665	365	1630	1530	1470	1125	925	610
9	515	670	380	1730	1615	1540	1275	945	670
10	525	695	400	1820	1700	1600	1375	1035	760
11	545	695	405	2220	1760	1670	1465	1110	860
12	645	695	410	2540	1860	1755	1490	1150	920
13	705	710	420	2680	2060	1855	1710	1175	965
14	805	730	435	2755	2120	1910	1795	1195	980
15	890	805	510	2905	2240	2010	1895	1240	1085
16	960	875	575	3105	2360	2195	1970	1320	1145
17	1010	940	640	3200	2435	2275	2065	1390	1215
18	1040	985	700	3220	2495	2335	2150	1450	1290
19	1065	1020	750	3885	2540	2395	2210	1510	1365
20	1100	1050	780	3960	2620	2475	2245	1530	1405
21	1135	1085	820	4020	2680	2530	2260	1565	1450
22	1155	1115	860	4120	2900	2650	2320	1575	1495
23	1180	1145	895	4190	2950	2665	2375	1600	1525
24	1210	1170	930	4250	3005	2700	2410	1615	1585
25	1225	1190	950	4290	3040	2730	2440	1625	1635
26	1225	1205	970	4310	3065	2760	2460	1640	1655
27	1230	1215	975	4325	3100	2775	2470	1650	1660
28	1240	1225	985	4360	3115	2790	2475	1670	1670
29	1245	1235	995	4380	3140	2800	2490	1675	1680
30	1260	1235	995	4385	3145	2810	2500	1675	1685
31	1260	1240	1000	4390	3155	2820	2500	1675	1695
32	1260	1250	1005	4395	3165	2825	2500	1685	1700
33	1265	1255	1010	4400	3165	2825	2505	1690	1700
34	1265	1255	1010	4405	3170	2830	2515	1695	1700
35	1270	1260	1010	4410	3175	2835	2515	1700	1705
36	1280	1260	1010	4420	3180	2840	2515	1700	1710

De acuerdo con la investigación de Castillo (2015), los resultados de su experimento muestran que, en la primera etapa de la investigación, las materias orgánicas con mayor producción de biogás ($P > 0.05$) fueron la gallinaza, el estiércol de bovino lechero, con una producción de 2.93 y 1.82 litros por cada 300 gramos de materia orgánica; respectivamente en un periodo de siete días.

En esta investigación se confirma que la gallinaza es el inóculo que induce una mayor producción de biogás en comparación con el experimento de Castillo (2015) donde se muestran resultados en un período de 7 días teniendo un volumen de biogás acumulado de 2.93 L con 300 g de materia mientras que los resultados del experimento fueron de 1.5 L en el periodo de 7 días con 80 g de materia orgánica.

La gallinaza es el inóculo que favoreció una mayor formación de biogás debido a su alto contenido de microorganismos, relación C/N y pH, lo cual permite acelerar el proceso de descomposición y hace más efectiva la transformación de sus elementos para generar biogás (Seclen, 2015).

De acuerdo con Castillo (2015), la gallinaza es el inóculo que presenta una mayor producción de biogás ya que está relacionado con su alto contenido de carbohidratos y proteínas. La gallinaza tiene un alto contenido nutritivo comparándolo con el estiércol bovino debido a que la alimentación de las gallinas se basa principalmente en granos, y las aves solo aprovechan de un 15-20% del alimento que consumen y excretan el resto.

Varnero (2011), menciona que el proceso de digestión anaerobia no solo requiere de carbono y nitrógeno, sino que también es necesaria la presencia de sales minerales en cierto equilibrio (azufre, fósforo, manganeso, zinc, cobalto, selenio níquel entre otros). Normalmente los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas (tabla 4), lo cual considera a la gallinaza como el inóculo que presenta los requerimientos para una mayor producción de biogás.

Tabla 4. Propiedades físicas y químicas de las diferentes fuentes de animales (Pérez et al., 2018).

Estiércol	pH	CE	MO	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Humedad (%)
Bovino	7	1	38	2	7	0.1	8.80	1.7	0.7	0.12	0.007	0.07	57.9
Gallinaza	7	1	63	3	3.8	2.3	11.3	0.9	0.4	0.04	0.003	0.02	34.3
Porcino	6	1	29	1	4	0.1	6	0.4	4	0.1	0.014	0.08	53.6

Por otra parte, es importante resaltar que el uso de nopal para la producción de biogás tiene una función de gran relevancia de acuerdo con algunos autores que describen características para su uso en dicho proceso.

De acuerdo con las investigaciones de Uribe (1992), durante el proceso de digestión anaerobia del abono animal, la adición de cladodios de nopal promueve que el material inicial se mantenga neutro o ligeramente ácido. El contenido de carbón y energías de los cladodios favorece el desarrollo de bacterias acidogénicas, las cuales generan las condiciones requeridas para las bacterias metanogénicas acelerando así el proceso de metanogénesis y la reducción del tiempo requerido para la digestión.

De acuerdo con un estudio realizado por Brayán (2014), se mostró que el pH tiene efecto sobre la digestión anaerobia, encontrándose mejores condiciones, en la producción de metano con valores cercanos a la neutralidad; valores menores, además de generar menor producción de metano, requieren un mayor tiempo de asimilación de la materia orgánica por parte de los microorganismos, lo que implicaría prolongados tiempos de retención y mayores volúmenes de reactores.

De acuerdo con estudios realizados por Rosa (2015), el nopal es rico en azúcares, acumula elevadas cantidades de agua en su interior, presenta una elevada relación C/N y teóricamente, puede alcanzar productividades de 50 ton/ha/ año. Por lo tanto, resulta ser un cultivo ideal para la digestión anaerobia, y especialmente para la co-digestión con sustratos de baja relación C/N, como en el caso de los estiércoles. Específicamente se recomienda el uso de los cladodios más jóvenes (menores de 2 años), ya que son los que presentan un mayor

contenido de azúcares sencillos y menos contenido en lignina y, por lo tanto, son fácilmente biodegradables (tabla 5).

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica del nopal (Rosa, 2015).

Parámetros	Caracterización fisicoquímica
C%	41.60
H%	5.60
N%	0.57
S%	0.10
Relación C/N%	72.98
ST%	13.52
SV%	12.24
pH	7.75

X. CONCLUSIONES

La gallinaza es un inóculo que permite aumentar la producción de biogás usando como sustrato principal nopal, por lo cual su uso con este propósito es recomendable en comunidades donde se encuentre en abundancia y sin otro aprovechamiento.

La implementación de los biodigestores a nivel laboratorio fueron los adecuados ya que se logró determinar el volumen de biogás acumulado mediante el método volumétrico.

El nopal desempeña un papel importante en el proceso de digestión anaerobia ya que en la revisión de literatura se da a conocer que regula el pH en la fase metanogénica.

El uso de los desechos de los animales junto con el nopal es una alternativa para generar energía limpia como el biogás, ya que durante el proceso de digestión anaerobia no se genera algún contaminante al medio ambiente y todos los derivados pueden ser utilizados.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta-Yaniris L., Obaya-Abreu M.C. (2005). Aspectos teóricos. Parte I ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar XXXIX (1): pp. 35-48. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>.
2. Amado-González E., Prada-Luna S. evaluación de la producción de biogás a partir de pollinaza. (2007). Disponible en:
http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIG/home_101/recursos/01general/27112014/soniatereza.pdf
4. Arreguín, Javier, Ramos, Maribel, Carapia, Isaías, Lezama P. (2016). Obtención de biogás a base de biomasa de nopal a nivel laboratorio (Opuntia ficus –indica) variedad Atlixco. Revista de Sistemas Experimentales 3(6):37-41.
5. Armendáriz. (2016). Generación de biogás a partir de residuos orgánicos del comedor de la Universidad de Sonora. Responsable: Dr. Francisco Javier Armendáriz Tapia. Disponible en:
<http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/20-1Biogas.pdf>
6. Barrena-Gurbillón M.A. Maicelo-Quintana J.L. Gamarra-Torres, O.A. Murga-Valderrama M.L. (2009). Parámetros para producir biogás en laboratorio con estiércol de bovino, agua de desagüe y cascara de papa. Disponible en:
<http://sbera.org.br/sigera2009/downloads/obras/060.pdf>
7. Blanco-Cobian D. (2011). Tratamiento biológico anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost. Tesis de Doctorado. Universidad De León. pp. 265. Disponible en:
<https://buleria.unileon.es/xmlui/bitstream/handle/10612/1066/Tesis.pdf>
8. CABI. (2018). Opuntia ficus-indica (tuna). Disponible en:
<https://www.cabi.org/isc/datasheet/37714>.
9. Campos-Pozuelos A.E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Tesis de Doctorado. Universidad de Lleida. 32 p.p. Disponible en:
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8229/Tecp1de1.pdf>
10. Castillo-Arzate V. (2015). Producción de biogás a partir de la utilización de estiércol

- ovino comparado con el de otras especies (bovino y gallina). Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. p.p. 63-64. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6710/63407%20CASTILLO%20ARZATE,%20VIANNEY%20%20TESIS.pdf?sequence=1>
11. Campos-Pozuelo A. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Tesis de Doctorado. Universidad de Lleida. pp. 54. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8229/Tecp1de1.pdf>
 12. Cervantes- Ramírez M.C. (2006). Los nopales (*Opuntia*) como recurso. Marzo 2018. Disponible en: http://fenix.cichcu.unam.mx/libro_e_2006/0965822/09_c05.pdf
 13. Constanza-Corrales L., Antolinez-Romero D.M., Bohórquez-Macías J.A., Corredor-Vargas A.M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. NOVA 13 (23): pp. 55-81. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>.
 14. Consejería de economía, Innovación y Ciencia. (2011). Estudio básico del biogás. Disponible en: https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_basico_del_biogas_0.pdf?fbclid=IwAR0KOTSeYq92SNOu3MijvJaJugRlZ12R5UeQu8NvhtPyHhBiezDJpAmB4k
 15. Córdova-Cortez S.P., Miño-Rosales B.D. (2015). Producción de biogás a partir de gallinaza con la adición de promotores de fermentación a 3 dosis. Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica de Cotopaxi. Latanguna, Ecuador. p.p.23. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/2736/1/T-UTC-00273.pdf>
 16. Córdoba- Montañó J.C. (2011). Aprovechamiento de los residuos de la granja porcícola Mesa del Seri, en Hermosillo Sonora, para la generación de energía eléctrica para su autoabastecimiento. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Hermosillo, Sonora, México. Pp.5. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5297/tesis.pdf?sequence=1>

17. Constanza-Corrales L., Antolinez-Romero D.M., Bohórquez-Macías J.A., Corredor-Vargas A.M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. NOVA 13(23): 58-59. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>
18. Corona- Zúñiga I.(2007). Biodigestores. Tesis de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Mineral de la Reforma Hidalgo. pp. 2-18. Disponible en:<https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf>
19. Cota-Sánchez J.H. (2016). Composición nutricional de la fruta del nopal. Marzo 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124081178000283>
20. Crampton. (2017). Themany uses of cow dung: a natural and renewable resource. Responsable: Bióloga Linda Crampton. Disponible en:<https://owlcation.com/agriculture/The-Many-Uses-of-Cow-Dung>
21. García-Suarez M., Suarez H. (2011). El nopal Opuntia ficus indica L. Miller. (Cactácea). La planta de la vida. Tecno Agro. 68. Disponible en:<https://tecnoagro.com.mx/revista/2011/no-68/el-nopal-opuntia-ficus-indica-l-miller-cactaceae-la-planta-de-la-vida/>
22. Graña-Margarinos J.J. (2015). Una fuente de energía renovable: el biogás. Características de su proceso productivo: la digestión anaeróbica. Disponible en: <http://publicacionesdidacticas.com/hemeroteca/articulo/057009/articulo-pdf>
23. Gungor-Demirci G., Demirer G. (2004). Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure. Bioresour Technol 93. pp. 109-117. Disponible en: <http://users.metu.edu.tr/goksel/environmental-biotechnology/pdf/42.pdf>
24. Jigar E., Sulaiman H., Asfaw A., Bairu A. (2011). Renewable biogas from Opuntia ficus indica (prickly pear cactus). Responsable: Doctor Willem Van Cotthem. Disponible en:<https://desertification.wordpress.com/2015/05/06/renewable-biogas-from-opuntia-ficus-indica-prickly-pear-cactus/>
25. Khalid A., Muhammad A., Muzammil A., Mahmood. (2011). The Anaerobic Digestion of Solid organic waste. Waste Management 31(8). pp. 1737-1744. Disponible en:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11001668>
26. Landeros-Gutiérrez C. (2013). Potencial de la biomasa residual del fruto de *Jatrofa curcas* L. para la producción de biogás: un enfoque experimental. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana Centro de Investigaciones Tropicales. pp. 26. Disponible en: <https://www.uv.mx/met/files/2015/11/LanderosGutierrezCesarSantosNoviembre2013pdf>
 27. López C., Martínez F., Paredes O. (2016). Automatización de un proceso de biodigestión anaeróbica. Revista Cubana de Ciencias Informáticas 10 (1): 01-16. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcci/v10s1/rcci01517.pdf>
 28. Lorenzo-Acosta Y., Obaya-Abreu M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA XXXIX (1). pp. 37. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
 29. Méndez-Gallegos J.S., Amante-Orozco A., Gómez-González A. García-Herrera J. (2010). El nopal en la producción de biocombustibles. Revista Salud Pública y Nutrición (5). pp. 73. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/266328071el_nopal_en_la_produccion_de_biocombustibles
 30. Nascimento-Santos T., Damilano-Dutra E., Gomes-Prado A., Bezerra- Leite F.C., Rodríguez-Souza R., Augusto-Morales C., Antonio-Moráis M. (2016). Potential for biofuels from the biomass of prickly pear cladodes: Challenges for bioethanol and biogas production in dry areas. ELSEVIER 85:215-222.
 31. Navarro-Soto R. (2016). Obtención de biogás a partir de residuos agrícolas y de producción de biodiesel. Tesis de Ingeniería. Universidad de La Laguna. pp. 10. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/2927/OBTENCION%20DE%20BIOGAS%20A%20PARTIR%20DE%20RESIDUOS%20AGRICOLAS%20Y%20DE%20PRODUCCION%20DE%20BIODIESEL.pdf?sequence=1>
 32. NopaliMex. (2015). El Santo Grial de las Energías Renovables. Responsable: ingeniero Miguel Aké Madera. Disponible en: <http://rtbioenergia.org.mx/wpcontent/uploads/2016/11/MiguelAk%C3%A9-Madera.pdf>

33. Parra-Orobio B.A. (2014). Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. Tesis de Ingeniería. Universidad del Valle. Disponible en: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7645/1/77200446398.pdf>
34. Parra-Orobio B., Torres-Lozada P., Marmolejo-Rebellón L., Cárdenas-Cleves L., Vásquez-Franco C., Torres-López W., Ordóñez-Andrade J. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 17(2): 553-562. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v17n2/v17n2a27.pdf>
35. Reyes- Agüero J.A., Aguirre-Rivera J.R., Hernández H0. (2005). Systematic notes and a Detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L) Mill. (cactácea).Agrociencia 39(4): 395-408l. Disponible en:<http://www.redalyc.org/pdf/302/30239404.pdf>
36. SAGARPA. (2011). Ofrece cultivo de nopal y tuna oportunidades a pequeños productores.Disponible:http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/boletines2/2011/julio/Documents/2011B42_2.pdf
37. Seclèn-Effio O. (2015). Gas a partir de pollinaza. Disponible en: <https://www.engormix.com/avicultura/foros/gas-partir-pollinaza-t21862/>
38. Seadi. (2008). Biogás. Responsable: Teodorita Al Seadi. Disponible en: <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>
39. Terán Y., Navas D., Petit D., Garrido E., Auberrete R. (2015). Análisis de las características físico-químicas del fruto de *Opuntia ficus- indica* (L.) Miller, cosechados en Lara, Venezuela. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. 16(1): 69-70. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/813/81339864010.pdf>
40. Tilley (2016). Cow dung fertilizer: learn the benefits of cow manure compost. Responsable: Ni kkitilley. Disponible en: <https://www.gardeningknowhow.com/composting/manures/cow-manure-compost.htm>
41. Lorenzo-Acosta Y., Obaya-Abreu C. (2005). La digestión anaerobia. ICIDCA XXXIX (1): 35-48. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
42. Córdova-Cortez S., Miño-Rosales B. (2015). Producción de biogás a partir de gallinaza con la adición de promotores de fermentación a 3 dosis, cantón salcedo, provincia de Cotopaxi, periodo. Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador. pp. 17-22. Disponible en:

- <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/2736/1/T-UTC-00273.pdf>
43. Catalán-Marín R.O. (2017). Evaluación energética del centro de acopio de nopal y verdura y del biodigestor asociado. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12904/Tesis.pdf?sequence=1>
 44. Ramos- Suarez J.L. (2014). Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. Procedente de diferentes procesos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. pp. 18. Disponible en: http://oa.upm.es/28957/1/JUAN_LUIS_RAMOS_SUAREZ.pdf
 45. Montesdeoca-Zambrano G.P. (2017). Evaluación de relaciones entre gallinaza y agua en la producción de biogás en la granja avícola “Zambrano Ponce” del Cantón Chone. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. pp. 10-13. Disponible en: <http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/601/1/TMA121.pdf>
 46. Ruiz-Cabrera C. M. (2002). Aplicación de digestores anaerobios discontinuos en el tratamiento de aguas residuales industriales. Tesis de Doctorado. Escuela Universitaria Politécnica de Sevilla. pp. 8. Disponible en: http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/4243/mod_resource/content/0/TesisCompletaTAR.pdf
 47. Paucar-Malpica L. (2015). producción y evaluación de la calidad del biogás y biol en un biodigestor usando estiércol de codorniz de la Velebit S.AC. ubicada en el Distrito de Lurigancho-Chosica. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú. pp. 21. disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2153/P06-P3-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 48. Sánchez-Godoy F. (2012). Potencial del cultivo de la chumbera (*opuntia ficus indica*) para la obtención de biocombustibles. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. pp. 31-34. Disponible en: http://oa.upm.es/14773/1/Francisco_Sanchez_Godoy.pdf
 49. Severiche-Sierra C.A., Acevedo-Barrios R. L. (2013). Biogás a partir de residuos

[E%20LABORATORIO.pdf?fbclid=IwAR1DfKblqM8M5sdJsJBvV0XvtGOPqAb5kjHyMuKpqM_AeEtCiILDjDM5-Wo](https://core.ac.uk/download/pdf/47250835.pdf)

57. López-Aguirre A.M., Ruiz-Rastrope C. (2014). Evaluación de la producción de biogás a partir del buchón de agua mediante codigestión anaerobia con estiércol bovino. Tesis de Licenciatura. Universidad EAFIT. Medellín. 20-22 p.p. disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/47250835.pdf>
58. Pérez A., Céspedes C., Núñez P. (2008). Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en república dominicana. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n3/art02.pdf>
59. García-Osuna H.T. (2013). Identificación de pectinas y mucilago de cuatro variedades de nopal (*Opuntia ficus indica*) Miller y su validación de su actividad hipoglucémica. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. 5-9 p.p. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/3456/1/1080256815.pdf>
60. Quintero-Vega M.C., Rondón-Castro Y.P. (2012). Estudio preliminar de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del mucilago del café utilizando lodo estiércol de cerdo como inóculo. Tesis de Licenciatura. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química Bucaramanga. p.p. 24. Disponible en: http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/145234.pdf?fbclid=IwAR3AqrNQMOV_RfoafD-foqNsfSKLyL5ag-KspqzS_BYtZcn90W4TjkuDDUM
61. FAO. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Responsable Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>
62. Rosa-Cruz R.J. (2015). Producción de biogás en sustrato solido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana. Xalapa Veracruz. p.p. 86-87. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/41980/RosaCruzRuth.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

63. Varnero-Moreno M.T. (2011). Manual de biogás. Disponible en:
<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
64. Verma, S. (2002). Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Tesis de Maestría. Columbia University. Disponible:
en:http://www.compost.org/CCC_Science_Web_Site/pdf/Biogas/anaerobic%20Digestion%20of%20Biodegradable%20Organics%20in%20MSW.pdf
65. Wayland R. (2010). El nopal, un biocombustible desconocido. Disponible en:<https://www.nuevamujer.com/bienestar/2010/12/21/el-nopal-un-biocombustible-desconocido.html>