



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



*Evaluación de la combinación de pretratamientos mecánico, químico, térmico y carga orgánica, a partir del sustrato *Opuntia ficus indica* en la producción de biogás*

TESIS presentada por:

Iris Sandoval Rojas

**A la División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería Química como requisito parcial
para obtener el Grado de:**

**MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

Directora de Tesis: Dra. Ma. Carmen Chávez Parga

Director de Tesis: Dr. José Apolinar Cortés

Morelia, Michoacán de Ocampo, febrero de 2020.

Dedicatoria

A *dios*, por la vida otorgada, para lograr mis sueños y nunca dejarme, acompañándome en todo momento, pero más en los momentos difíciles, así como enviando personas que han marcado mi vida para siempre.

A mi *hermanita Elizabeth* que a su corta edad me enseña de lo hermoso de la vida, y me motiva a ser mejor cada día, convirtiéndose en uno de mis motivos para superarme en mi vida.

A mi *hermana Darí*, que me muestra que puedes lograr que quieras si te lo propones y de igual manera es un motor para mi vida

A *mi madre* que siempre ha creído en mí, sin importar cuantas veces falle, ella nunca me ha dejado.

A *mi padre* que siempre busca la forma de verme sonreír y hacerme sentir bien.

A mis *hermanos y hermanas* gracias por estar conmigo, en las buenas y malas.

¡Un acto sincero de bondad provoca otro!

Contenido

Resumen	V
Abstract	VII
Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XI
Glosario	XIII
Nomenclatura	XV
Agradecimientos	XVI
Capítulo I. INTRODUCCIÓN	XVII
1.1. Generalidades	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Justificación	4
1.4. Planteamiento del Problema	5
1.5. Hipótesis	6
1.6. Objetivos	6
1.6.1. Objetivo General	6
1.6.2. Objetivos particulares	6
Capítulo II. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Biomasa	7
2.1.1. La biomasa en el contexto energético	7
2.2. Clasificación de los biocombustibles a partir de la biomasa	7
2.3. Procesos empleados para la producción de biocombustibles (biomasa)	8
2.4. Digestión anaerobia	10
2.5. Etapas de la digestión anaerobia	10
2.6. Factores que influyen en el proceso anaerobio	12
2.6.1. Temperatura	13
2.6.2. Potencial de hidrógeno, pH	13
2.6.3. Alcalinidad	14
2.6.4. Ácidos grasos volátiles (AGV's)	14
2.6.5. Carga orgánica	15
2.6.6. Nutrientes	15
2.7. Biogás	16

2.8. Cactácea <i>Opuntia ficus indica</i> (nopal)	17
2.8.1. Origen, distribución y taxonomía de los nopales	17
2.8.2. Descripción de la planta	17
2.8.3. Composición fitoquímica y fisicoquímica del nopal	18
2.8.4. Estructura y composición de los principales polisacáridos presentes en el nopal	19
2.9. Diseño experimental Taguchi	19
2.10. Biochemical methane potential (<i>BMP</i>)	20
2.11. Pretratamientos	21
2.11.1. Mecánico	23
2.11.2. Térmico	24
2.11.3. Químico	24
2.11.4. Pretratamiento alcalino	24
Capítulo III. METODOLOGÍA	27
3.1. Ubicación experimental	27
3.2. Sustrato e inóculo	27
3.3. Pretratamiento del sustrato cactácea <i>Opuntia ficus indica</i>	27
3.4. Diseño de experimento Taguchi L_8	28
3.5. Ensayos <i>BMP</i>	28
3.6. Métodos analíticos	29
3.7. Análisis de la composición de biogás	30
3.8. Análisis estadístico	30
Capítulo IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1. Sustrato e inóculo	31
4.1.1. Caracterización fisicoquímica del sustrato	32
4.1.2. Caracterización del inóculo	33
4.1.3. Parámetros de viabilidad del inóculo	34
4.2. Parámetros fisicoquímicos de los pretratamientos combinados	35
4.3. Construcción del sistema <i>BMP</i>	37
4.4. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en la mezcla de la prueba <i>BMP</i>	37
4.4.1. Comportamiento del pH inicial y final	37
4.4.2. Comportamiento inicial y final de la conductividad	38
4.4.3. Comportamiento inicial y final de la alcalinidad	39
4.4.4. Comportamiento inicial y final de los AGV's	40

4.4.5. Comportamiento inicial y final de la DQO	41
4.4.6. Comportamiento inicial y final de los sólidos totales (ST).....	43
4.5. Producción de biogás	48
4.5.1. Perfil de producción de biogás por prueba	48
4.5.2. Calidad del biogás	54
4.5.3. Rendimientos a biogás y a metano	55
4.6. Análisis estadístico del diseño de experimentos.....	56
4.6.1. Análisis de la “señal ruido” en la producción de biogás	56
4.6.4. Análisis de medias de medias en la producción de biogás	57
CONCLUSIONES.....	62
Conclusiones	63
RECOMENDACIONES.....	64
Recomendaciones	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS.....	71

Resumen

Evaluación de la combinación de pretratamientos mecánico, químico, térmico y de carga orgánica, para la producción de biogás a partir de la cactácea *Opuntia ficus indica* como sustrato

Iris Sandoval Rojas

Febrero 2020

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Directores: Dra. Ma. Carmen Chávez Parga, Dr. José Apolinar Cortés

El presente trabajo tuvo como objetivos establecer el control de un reactor anaerobio, su estabilización e incrementar generación de biogás a partir de la biomasa del desperdicio agroindustrial de la cactácea *Opuntia ficus-indica* (nopal). Para lograr estos objetivos se implementaron pretratamientos combinados a la cactácea: mecánico por medio de molienda fina y gruesa, térmico con temperaturas de 30° C y 40° C, las cuales están dentro de los intervalos donde las bacterias anaerobias se desarrollan favorablemente, el químico con ajuste de pH en intervalos entre los 6.5 y 8.5, finalmente el de concentración con base a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cual indica la materia orgánica oxidable. Estos pretratamientos ayudaron a aumentar la DQOs, disminución de AGV's, elevación de alcalinidad y solubilización de materia orgánica. Posteriormente, a partir de un diseño de experimentos Taguchi L₈, se obtuvieron pretratamientos combinados de 8 pruebas y 2 testigos, los cuales se implementaron en pruebas *BMP* (*Biochemical methane potential*). Los resultados fisicoquímicos usados para el control de un reactor anaerobio se encontraron dentro de los intervalos recomendados, tomando como respuestas producción, calidad y rendimiento a biogás. El mejor resultado se obtuvo con la siguiente combinación de los pretratamientos: molienda gruesa, concentración a 30,000 mg/L, pH 8.5, temperatura 30° C, volumen producido 1,118.00 mL, con 56 % de metano y rendimiento de 100.08 mL CH₄/g. Es importante notar que los demás resultados también mostraron calidad en el metano. De acuerdo con los resultados obtenidos, los pretratamientos fueron funcionales para incrementar producción de biogás y su calidad, dado que el testigo de nopal troceado sólo se obtuvo una calidad de biogás del 34%, aun con una relación C/N/P de 466.80/7.9/1 fuera de lo reportado para el funcionamiento de los sistemas anaerobios debido a que se tenía menor cantidad de Fósforo (P). A partir de estos resultados se pueden tomar las variables de control, necesarias para el adecuado funcionamiento de un reactor anaerobio.

Palabras clave: *Combinación de pretratamientos, calidad de biogás, metano, digestión anaerobia, BMP.*

Abstract

Evaluation of the combination of mechanical, chemical, thermal and organic load pretreatments for the production of biogas from the *Opuntia ficus-indica* cactus as substrate

Iris Sandoval Rojas

February 2020

Master in Science in Chemical Engineering

Supervisors: Dra. Ma. Carmen Chávez Parga, Dr. José Apolinar Cortés

The objective of this work was to establish the control of an anaerobic reactor, its stabilization and increase the generation of biogas from the biomass of the agroindustrial waste of the *Opuntia ficus-indica* cactus. In order to achieve these objectives, combined pretreatments to cacti were implemented: mechanical by means of fine and coarse grinding, thermal with temperatures of 30 °C and 40 °C, which are within the intervals where anaerobic bacteria develop favorably, the chemical with pH adjustment in intervals between 6.5 and 8.5, finally the concentration based on the Chemical Oxygen Demand (COD), which indicates the oxidizable organic matter. These pretreatments helped to increase the COD, decrease of VGAs, elevation of alkalinity and solubilization of organic matter. Subsequently, from a design of Taguchi L₈ experiments, combined pretreatments of 8 tests and 2 controls were obtained, which were implemented in BMP (Biochemical methane potential) tests. The physicochemical results used for the control of an anaerobic reactor were found within the recommended intervals, taking as production, quality and biogas performance responses. The best result was obtained with the following combination of pretreatments: coarse grinding, concentration at 30,000 mgCOD/L, pH 8.5, temperature 30 °C, volume produced 1,118.00 mL, with 56% methane and yield 100.08 mL CH₄/g. It is important to note that the other results also showed methane quality. According to the results obtained, the pretreatments were functional to increase biogas production and its quality, since the chopped prickly pear cactus witness only obtained a biogas quality of 34%, even with a C/N/P ratio of 466.80/7.9/1 out of what was reported for the operation of anaerobic systems due to the lower amount of P (phosphor). From these results, the control variables, necessary for the proper functioning of an anaerobic reactor, can be taken.

Keywords: Combination of pretreatments, biogas quality, methane, anaerobic digestion, BMP

Lista de Figuras

FIGURA		Pág.
Figura 1	Procesos de conversión de biomasa (Naik <i>et al.</i> , 2010)	9
Figura 2	Digestión anaerobia. Etapas y grupos microbianos. Fuente: Sáenz., 2006	10
Figura 3	Métodos para el sistema <i>BMP</i>	21
Figura 4	Procesos de conversión de biomasa (Naik <i>et al.</i> , 2010), (Kumari <i>et al.</i> , 2018) (Kumar <i>et al.</i> , 2019)	23
Figura 5	Componentes estructurales de los MCLs (Alonso <i>et al.</i> , 2012)	25
Figura 6	a) Sistema <i>BMP</i> (volumétrico), b) Reactor <i>Batch</i> , y captador de biogás	29
Figura 7	a) cactácea <i>Opuntia ficuas indica</i> , b) inóculo.	31
Figura 8	Relación de DQO_T y DQO_S del sustrato	
Figura 9	Sistema <i>BMP</i> (volumétrico)	36
Figura 10	Comportamiento del pH inicial y final en la prueba <i>BMP</i>	37
Figura 11	Comportamiento de la conductividad inicial y final	38
Figura 12	Comportamiento de la Alcalinidad inicial y final	39
Figura 13	Comportamiento de la AGV's inicial y final	41
Figura 14	Comportamiento de la DQO inicial y final	41
Figura 15	Comportamiento de la DQO inicial y final en el sustrato	42
Figura 16	Comportamiento de los ST (Sólidos Totales) inicial y final	43
Figura 17	Comportamiento de los ST en el sustrato después de la prueba <i>BMP</i>	44
Figura 18	Comportamiento de los STV (Sólidos Totales Volátiles) inicial y final	45
Figura 19	Comportamiento de los STV (Sólidos Totales Volátiles) en el sustrato	46
Figura 20	Comportamiento de los SSTV (Sólidos Suspendidos Volátiles) inicial y final del inóculo	47
Figura 21	Producción de Biogás en la prueba <i>BMP</i> por día y total acumulado de producción.	48
Figura 22	Producción de Biogás en la prueba <i>BMP</i> por día y total acumulado de producción.	49
Figura 23	Producción de Biogás en la prueba <i>BMP</i> por día y total acumulado de producción.	50

Figura 24	Producción de Biogás en la prueba <i>BMP</i> por día y total acumulado de producción.	51
Figura 25	Producción de Biogás en la prueba <i>BMP</i> por día y total acumulado de producción.	52
Figura 26	Calidad de biogás	53
Figura 27	Efectos de principales para Relaciones de SN medias de datos	54
Figura 28	Efectos de principales para medias de medias	55
Figura 29	Interacción para medias en el pretratamiento mecánico	56
Figura 30	Interacción para medias en el pretratamiento concentración	57
Figura 31	Interacción para medias en el pretratamiento químico y térmica	58

Lista de Tablas

TABLA		Pág.
Tabla 1	Etapas de la anaerobiosis y sus reacciones	10
Tabla 2	Requerimientos elementales de las bacterias del metano	12
Tabla 3	Relaciones C: N:P en reactores Anaerobios	15
Tabla 4	Producción teórica de biogás a partir de diversos compuestos y composición de este	16
Tabla 5	Composición química del nopal (<i>Opuntia</i> sp.) con base a 100 g de materia fresca y la fibra en peso seco	18
Tabla 6	Polisacáridos estructurales de 5 especies de <i>Opuntia</i>	19
Tabla 7	Diseño de experimentos Taguchi L ₈ para el pretratamiento del sustrato	37
Tabla 8	Combinación de pretratamientos del diseño de experimentos Taguchi L ₈	37
Tabla 9	Métodos y normas para parámetros fisicoquímicos	39
Tabla 10	Caracterización del sustrato	43
Tabla 11	Caracterización del inóculo	44
Tabla 13	Parámetros de viabilidad del inóculo	45
Tabla 14	Pretratamientos y parámetros fisicoquímicos de las pruebas del diseño Taguchi L ₈	46
Tabla 16	Producción de Biogás en la prueba <i>BMP</i> por día y el total de producción	61
Tabla 17	Rendimiento de biogás y metano de la prueba <i>BMP</i>	65
Tabla 18	Respuesta para relaciones de señal a ruido más grande es mejor	66
Tabla 19	Respuesta para medias	67

Glosario

- **Ácidos Grasos Volátiles (AGV's):** son un subgrupo de ácidos grasos con cadenas carbonadas de menos de seis carbonos. Su volatilidad se debe a la corta cadena carbonada que poseen, en la digestión anaerobia son intermediarios en la formación del metano.
- **Alcalinidad:** medida del contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos de calcio, magnesio, sodio y potasio fundamentalmente; se expresa en mg CaCO₃/L, y representa la capacidad tampón del contenido del digestor.
- **Biogás:** gas (CH₄, CO₂, H₂S, H₂O) combustible, por reacciones bioquímicas de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno.
- **Biomasa:** Cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, susceptibles de ser transformados en combustible útil para el hombre y expresada en unidades de superficie y de volumen.
- **Cactácea:** conjunto como cactus, cactus o cacti.
- **Celulosa:** polímero lineal formado por unidades de glucosa unidas mediante enlaces β (1→4). Los enlaces β forman cadenas lineales altamente estables y resistentes a los tratamientos químicos debido a los puentes de hidrógeno que se forman entre cadena vecinas de celulosa.
- **Conductividad electrolítica:** es la medida de la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica y es a veces denominado "conductancia específica".
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO o DQO_T):** La concentración de la masa de oxígeno equivalente a la cantidad de dicromato consumida por la materia disuelta y suspendida cuando una muestra de agua se trata con este oxidante bajo condiciones definidas.
- **Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs):** biomasa consume más rápidamente (en pocos minutos), generando una rápida y elevada demanda de oxígeno. Los compuestos que conforman esta fracción son sustancias solubles, de bajo peso molecular, como es el caso de azúcares, alcoholes y ácidos grasos.
- **Hemicelulosa:** son un grupo de heteropolisacáridos constituidos por cadenas cortas y ramificadas de azúcares, entre los que destacan pentosas (generalmente D-xilosa y L-arabinosa), hexosas (como D-galactosa, D-glucosa y D-manosa), así como ácidos urónicos (ácidos glucurónicos, 4-O-metilgalacturónico y galacturónico) y desoxihexosas (ramnosa y fucosa).
- **Lignina:** polímero tridimensional amorfo formado por la polimerización de unidades de fenilpropano que implica la formación de diferentes tipos de enlaces que se alternan de manera desordenada.
- **Metano:** gas incoloro, inflamable, no tóxico, cuya fórmula química es CH₄. Este gas se produce de forma natural por la descomposición de la materia orgánica.
- **Mucilago:** polímero lineal heterogéneo, compuesto principalmente de polisacáridos estos están estrechamente relacionados con las pectinas.
- **pH:** Es la actividad relativa de los iones de hidrógeno en la disolución:

$$pH = -\log a_{H^+} = -\log \left(\frac{m_{H^+}}{m^0} \right)$$

Aquí, a_H es la actividad relativa del ión hidrógeno (en base molal); γ_H es el coeficiente de actividad molal del ión hidrógeno H^+ a la molalidad $m_{\gamma H}$, y m^0 es la molalidad estándar. La magnitud pH es considerada como una medida de la actividad de los iones hidrógeno en la disolución.

- **Relación Alfa (α):** relación de alcalinidades.
- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de $1,5 \mu m$ secado y llevado a masa constante a una temperatura de $105^\circ C \pm 2^\circ C$.
- **Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV):** Son aquellos sólidos suspendidos que se volatilizan en la calcinación a $550^\circ C \pm 50^\circ C$.
- **Sólidos Totales (ST):** Es el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de $105^\circ C \pm 2^\circ C$.
- **Sólidos Totales Volátiles (STV):** Cantidad de materia orgánica e inorgánica que se volatiliza por el efecto de la calcinación a $550^\circ C \pm 50^\circ C$.

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
AGV's	Ácido Grasos Volátiles
BMP	<i>Biochemical Methane Potential</i>
C/N/P	Relación Carbono Nitrógeno y Fósforo
CaCO ₃	Carbonato de calcio
CH ₃ OOH	Ácido acético
CH ₄	Metano
DA	Digestión Anaerobia
DQO _o	Demanda Química de Oxígeno
DQO _T	
DQOs	Demanda Química de Oxígeno Soluble
FM	<i>Fresh Matter</i>
NmL/ gSV	Normales mililitros por gramo de sólidos volátiles por día (0° C, 1013 hPa).
N _T	Nitrógeno total
pH	Potencial de hidrógeno
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
ST	Sólidos Totales
STV	Sólidos Totales Volátiles
TS	<i>TS basis</i>

Agradecimientos

A *dios* que en todo momento estuvo conmigo, guiando mi camino, así como enfrentando adversidades.

A *mi familia* que, aunque están lejos siempre están conmigo y apoyándome en cada decisión.

A *la Dra. Ma. Del Carmen y al Dr. José apolinar* que, me permitieron trabajar con ellos bajo su asesoría, gracias por contribuir en mi formación como profesional y humana.

Al *Dr. Rafael Maya*, por el aporte a mi trabajo para poder mejorar el trabajo de tesis.

A *MCIQ Julio Cesar Jacuinde* que, siempre me alentó a seguir adelante como un hermano mayor.

A *MCIQ Luis Germán* que, me animó a creer en mí cuando yo no creía en mí, a tener confianza, compartiendo el trabajo, las alegrías y tristezas, gracias por creer en mí.

A *Isaac, Pablo y Ulises*, por sus enseñanzas tanto en el salón de clases como en lo personal.

A *los pay's* que, aunque casi culminaba mi trabajo me ayudaron mucho, espero seguir trabajando con ustedes.

Y en general a todas las personas que estuvieron conmigo y que si nos la cite no signifique que no estuvieron conmigo gracias por todo.

A *la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posgrado de Ingeniería Química*, por darme la oportunidad de superarme profesionalmente.

A *Conacyt*, por la beca otorgada durante el periodo de marzo 2018 a febrero 2020.

A *el Programa de Investigación de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH*, por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo del trabajo.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El presente trabajo tuvo como objetivos establecer el control de un reactor anaerobio, su estabilización e incrementar generación de biogás a partir de la biomasa del desperdicio agroindustrial de la cactácea *Opuntia ficus-indica* (nopal). Para lograr estos objetivos se implementaron pretratamientos combinados a la cactácea: mecánico por medio de molienda fina y gruesa, térmico con temperaturas de 30° C y 40° C, las cuales están dentro de los intervalos donde las bacterias anaerobias se desarrollan favorablemente, el químico con ajuste de pH en intervalos entre los 6.5 y 8.5, finalmente el de concentración con base a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cual indica la materia orgánica oxidable. Estos pretratamientos ayudaron a aumentar la DQOs, disminución de AGV's, elevación de alcalinidad y solubilización de materia.

En este Capítulo se revisan algunos antecedentes, marco teórico, así como se planteó el problema a tratar, la Hipótesis y los Objetivos que se cubrieron durante el desarrollo del proyecto.

1.2. Antecedentes

Orozco y *col.*, (2018); reportaron una mejora de la producción de biogás y biofertilizante de *Opuntia heliabravoana Scheinvar*, a partir de los residuos de esta se estudió el efecto combinado del ajuste de la relación C/N y un pretratamiento alcalino (AP) para la producción de biogás y biofertilizante en reactores anaerobios. Los biorreactores AP produjeron más biogás que el control (C, sin el efecto combinado de AP); Además, en este proceso, no fue necesario utilizar agua adicional debido al alto contenido de agua que está presente en el tejido de este cultivo. Por otro lado, ambos biofertilizantes (C y AP) tenían grupos microbianos esenciales que ayudan a mejorar la nutrición de las plantas como reductores de azufre (S), oxidantes de azufre (S), amilolíticos, bacterias celulíticas, mineralizadores anaeróbicos, hongos celulíticos y solubilizadores de fósforo (P). Además, el tratamiento AP para ayudar a aumentar la concentración de nitrógeno total (N_T) 1.5:1 disminuyó los microorganismos patógenos en el biofertilizante en comparación con el tratamiento C.

Ramírez y *col.*, (2017); evaluaron el ciclo de vida de la producción de biogás a través de co-digestión anaerobia de cladodios de nopal y estiércol de vaca lechera, en este estudio el análisis se llevó a cabo, para evaluar los impactos ambientales asociados con el proceso y el equilibrio energético de la producción, usando una línea de base y tres escenarios que tenían diferente sistema agrícola y estrategias de gestión de almacenamiento, los datos fueron obtenidos de un biodigestor de 10 litros.

Estos indicaron que el sistema de agricultura ecológica disminuye el impacto ambiental en un 22,5% en la categoría de potencial de calentamiento global, pero aumenta la acidificación potencial de cationes y de eutrofización potencial categoría impacto valores de 47,2 y 45% respectivamente, mientras que cubre los resultados de los digestores en una reducción del 2,3% en el potencial de calentamiento global y en una reducción de 1,7% en el potencial de formación de ozono fotoquímico. Sobre la base de estos resultados, la producción de biogás a partir de cladodios de nopal y co-digestión, ofrece una producción de energía limpia debido a el potencial de calentamiento global tiene un valor menor que la reportada como materias primas similares. El uso de estas dos biomásas combina las ventajas de una planta de biomasa que se acumula eficientemente y existe la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el uso de uno de los principales residuos en la producción de productos lácteos.

Calabrò y *col.*, (2017); en la investigación de tres técnicas de pretratamiento (térmicos, alcalinos, ácidos) sobre la composición química y el rendimiento de metano de la biomasa *Opuntia ficus*, usaron un diseño de experimentos compuesto con tres factores y dos a tres niveles se implementó, se empleó un modelo de regresión utilizando un total de 10 pruebas *BMP*, los rendimientos de metano fueron de 289 hasta 604 Nm L / g SV adicional; según los resultados, se encontró que sólo el tratamiento previo ácido (HCl) fue significativo para aumentar la generación de metano.

Sin embargo, como los valores experimentales eran bastante superiores, con respecto a la producción de metano teórico del sustrato, este efecto todavía tiene que ser confirmado a través de una nueva investigación. El pretratamiento alcalino (NaOH) no lo hizo notablemente afectan (se registró una reducción media del 8%) los rendimientos de metano, a pesar del hecho de que se redujo significativamente el contenido de lignina. El pretratamiento térmico no tuvo efecto sobre los rendimientos de metano, sin embargo, se observó que su composición química (usando microscopía electrónica de barrido), revelo cambios en la estructura química después de la adición de NaOH y HCl. Modelado de la producción de metano acumulado por la ecuación de *Gompertz* modificada fue un éxito y con la ayuda en la comprensión de las ventajas cinéticas vinculados a algunos de los tratamientos previos. La máxima tasa de producción de metano específica (NmL /CH₄) 36.3 contra 18.6 para el control.

Cruz (2015); reportó la producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café, implementaron la co-digestión usando como co-sustrato el nopal, para el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas compensado las carencias de cada uno de los

substratos por separado, tomaron en cuenta que los co-sustratos de fácil degradación que confiere una estabilidad al sistema así como el incremento de la generación de biogás, con el objetivo de comparar la producción de biogás en mono sustrato usando la pulpa de café y co-sustrato con nopal.

Mediante ensayos de biodegradabilidad se empleó la norma VDI 4630 de la *Verein Deutscher Ingenieur* (Asociación Alemana de Ingenieros), se determinó la idoneidad del sustrato para su empleo en la digestión anaerobia, analizando la biodegradabilidad máxima, así como la máxima producción de biogás y metano, se usaron reactores anaerobios tipo *batch* o continuos realizando cuatro muestras (blanco-inóculo, nopal, pulpa de café, mezcla P/N) por triplicado preparadas en reactores de 600 ml, en condiciones de operación óptimas. Los resultados obtenidos de las mezclas en la generación de biogás y metano (CH₄) fueron en la pulpa de café biogás: 322.46±13.44 L kgSV⁻¹, CH₄:217.16±2.21 L kgSV⁻¹, %CH₄:70.61±3.37; en el nopal son biogás: 814.40±50.97 L kgSV⁻¹, 709.10±5.81 709.10±5.81, %CH₄ 89.74±3.59, y en la mezcla de P/N la obtención de biogás fue de 635.53±25.69 L kgSV⁻¹ CH₄ 526.56±5.55, %CH₄ 85.43±2.35. Demostrando que la adición de nopal a la pulpa de café como co-sustrato produjo los efectos deseados, debido al se incrementó la relación C/N, aumentando los rendimientos a biogás y metano.

Godoy (2012); para la generación de biogás, en la investigación: Potencial del cultivo de la Chumbera (*Opuntia ficus- indica (L) Miller*), para la obtención de biocombustibles, se usaron cladodios sin espina, dividiéndose en mono digestión en un digestor tipo *batch* y la co- digestión con tomate canario y de rama en un digestor semicontinuo respecto a la alimentación, diseñados por el grupo de Agro energética consistían en dos cilindros de PVC, la instalación comprendió de 8 digestores se ubicaron en cubetas aisladas mediante material calorífero y calefactadas mediante resistencias eléctricas termostatizadas a una temperatura nominal de 37° C.

Ramos y col., (2014); realizaron un diseño de experimentos a partir de mezclas con distintas proporciones de frutos de tomate y cladodios de chumbera se crearon cuatro sustratos de fermentación diferentes, con la misma carga orgánica en cada uno de ellos (expresado en gramos de sólidos volátiles por litro de sustrato; SV/L) y de tal modo que la proporción en peso fresco de tomate y chumbera en cada uno fuese de 3:1, 1:1, 1:3 y 0:1 respectivamente cada uno de los cuatro sustratos se empleó para alimentar dos digestores, el pre tratamiento de los cladodios fueron lavados, secados y cortados con cuchillo en tiras finas, posteriormente trituradas en un robot Blixer 4 V.V y de igual manera con los tomates. La obtención de biogás en los 8 ensayos, en la porción de 1:0 siendo la más elevada con 371 L kgSV⁻¹ siendo solo la mono digestión.

En el estudio sobre la Optimización del proceso de digestión de *Scenedesmus sp* y *Opuntia maxima* para la producción de biogás. La biomasa *Scenedesmus* no es un sustrato adecuado para la digestión anaerobia debido a su baja biodegradabilidad y bajo rendimiento de biogás. El objetivo del estudio fue evaluar la co-digestión anaeróbica de la biomasa *Scenedesmus* microalgal y los cladodios *Opuntia maxima*, esta última añadida para mejorar el proceso de digestión. Se realizaron ensayos por lotes para evaluar posibles efectos sinérgicos en diferentes mezclas de ambos sustratos. La mezcla con mayor rendimiento de metano se digirió en modo semicontinuo a diferentes concentraciones de SV. La materia prima compuesta por 75% de *O. maxima* y 25% de *Scenedesmus* (SV base) mostró el mayor rendimiento de metano aumentando 66.4% y 63.9% el de *Scenedesmus* y *O. maxima*, respectivamente. En el modo semicontinuo, la tasa de carga orgánica ideal (OLR) con una concentración de alimentación de SV del 6% fue de 4 g SV L⁻¹ d⁻¹, que produjo 292 ± 39 LCH₄ kgSV⁻¹ (15 días TRH). En el caso de una concentración de alimentación de SV del 8%, la OLR (Organig loading rate ó Tasa de Carga Orgánica) ideal fue de 5,33 g/SV L⁻¹ d⁻¹, que produjo 308 ± 22 L CH₄ kgSV⁻¹ (15 días TRH). La co-digestión de la biomasa *O. maxima* y *Scenedesmus* mejoró el proceso de digestión anaeróbica y evitó la inhibición causada por la baja relación C/N de microalgas.

1.3. Justificación

En la creciente concientización acerca de los problemas ambientales del planeta, como reducir los gases de efecto invernadero debidos al uso de combustibles fósiles. Esto se ha convertido en una realidad social que amenaza gravemente a distintos ecosistemas, debido a que alrededor de 21.3 mil millones de toneladas tan solo de dióxido de carbono (CO₂) son emitidos al año. Se estima que los procesos naturales de captación de CO₂ sólo pueden absorber alrededor de la mitad de esta cantidad; por lo tanto, hay un excedente de 1,065 mil millones de toneladas de CO₂, los cuales se liberan a la atmósfera cada año. Se sabe que el CO₂, incrementa la radiación atmosférica y, por lo tanto, contribuye al calentamiento global (Yildiz, 2018).

Debido a esto actualmente hay una tendencia global hacia la generación de energía renovable para ayudar a reducir las emisiones globales de efecto invernadero, incluidas las emisiones de los combustibles fósiles (Yildiz, 2018; Fernández, 2012). Una alternativa que se ha impulsado es el uso de biomasa como fuente de energía en forma de biocombustibles (Faba *et al.*, 2014); sin embargo, los biocombustibles de primera generación trajeron consigo grandes problemas sociales y ambientales, debido a que los cultivos cambiaron drásticamente el uso del suelo, provocando infertilidad, disminución de la disponibilidad de alimentos, y una dinámica de encarecimiento de los alimentos, especialmente en los países en desarrollo (Ruane *et al.*, 2010).

Derivado de estos impactos negativos, la producción se está desplazando a los biocombustibles de segunda generación, investigación de nuevas materias primas, el analizar y encontrar sustratos más adecuados, incluyendo la disponibilidad de residuos agroindustriales, la adaptación de cultivos energéticos de segunda generación para el suelo y el clima local (Calabrò *et al.*, 2017). Los biocombustibles de segunda generación llamados también ligno-celulósicos, son producidos de materias primas no alimentarias, tales como residuos agroindustriales y gramíneas forrajeras de alta producción de biomasa (Machado *et al.*, 2010). En la obtención de biocombustibles gaseosos o biogás, a partir de la digestión anaerobia de residuos agroindustriales, se han usado sustratos con altas cargas orgánicas, como aguas residuales de rastros, residuos sólidos urbanos, entre otros (Palomares, 2013).

Es por eso que, en la obtención de biogás, a partir de la cactácea *Opuntia ficus-indica* (nopal), de los desperdicios por podas de los cultivos de nopalito como verdura, en el fruto (tuna) y de la grana (empleada para obtención de colorante). En estudios realizados se muestra que el nopal tiene características que favorecen al proceso de digestión anaerobia, como su elevado porcentaje de hidratos de carbono, su bajo contenido de lignina, y su elevada relación de C/N/P, carbono/nitrógeno/fósforo (Cruz, 2015).

Sin embargo, los reactores anaerobios tienen problemas de control y estabilización, por lo que se buscan alternativas para solventar dichos problemas. Una de ellas es el pretratamiento del sustrato con la finalidad de incrementar la generación de biogás; estos ayudan a la degradación de algunas macromoléculas y solubilizan la materia orgánica (Pascual *et al.*, 2011). En este estudio los pre-tratamientos implementados en el sustrato fueron mecánico, químico, térmico y de concentración. La combinación de pretratamientos que permitió establecer las condiciones para la mayor generación de biogás y control del reactor, se obtuvo por medio de pruebas *BMP* en reactores por lotes, a escala laboratorio, mediante un diseño de experimentos Taguchi L_8 .

1.4. Planteamiento del Problema

El uso de los reactores anaerobios es una alternativa para la generación de bioenergía, así como el tratamiento de residuos agrícolas, sin embargo, debido a los problemas de control y estabilización de estos, es necesario buscar e implementar alternativas en los sustratos. Para ello una alternativa es la implementación de un pretratamiento combinado mecánico, químico, térmico y de carga orgánica sobre el sustrato (nopal *Opuntia ficus-indica*) para lograr la estabilización, control y a su vez una mayor generación de biogás.

1.5. Hipótesis

Cuando se implemente un pretratamiento combinado mecánico, químico, térmico y de carga orgánica en el sustrato nopal (*Opuntia ficus-indica*), se logrará la estabilización y, en consecuencia, el control del reactor, mejorando tanto el rendimiento como la calidad del biogás.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Implementar experimentalmente las condiciones de control y estabilización en un reactor anaerobio, a partir de la combinación de pretratamientos en el sustrato nopal *Opuntia ficus-indica*, siendo estos mecánicos, químico, térmico y de carga orgánica para la producción de biogás.

1.6.2. Objetivos particulares

- Evaluar las características fisicoquímicas de nopal *Opuntia ficus-indica*, así como del inóculo.
- Determinar las condiciones de operación, el potencial de generación de biogás y la combinación de los pretratamientos mecánico, químico, térmico a partir de un diseño de experimentos Taguchi L₈, que permitan incrementar el rendimiento a biogás y su calidad mediante pruebas *BMP*.
- Evaluar la composición y el rendimiento a biogás y a metano, en particular, a partir del seguimiento de la DQO de las pruebas *BMP*.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1. Biomasa

La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materia orgánica, tanto por su origen como por su naturaleza como residuos agrícolas, forestales, urbanos, cultivos energéticos etc., (Fernández, 2012) la energía que proviene de esta es una fuente de energía limpia y renovable, derivada de la fotosíntesis, La energía acumulada en la biomasa puede ser liberada sometiéndola a diversos procesos de aprovechamiento energético, para sustituir recursos convencionales de combustibles fósiles (Kumar *et al.*, 2019; López *et al.*, 2002).

2.1.1. La biomasa en el contexto energético

En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta (Fernández, 2012), y lo obtenido de esta son llamados biocombustibles pueden ser o no transformados o procesados distinguiéndose a los biocombustibles sólidos, líquidos, gaseosos (Maserá *et al.*, 2011). La conversión de la biomasa principalmente se da en tres formas: térmica, de transporte y química (Kumari *et al.*, 2018).

2.2. Clasificación de los biocombustibles a partir de la biomasa

La producción de los biocombustibles a partir de la biomasa se clasifican de acuerdo con el insumo o materia prima y la tecnología empleada para producirlos, clasificándose por generaciones, primera, segunda y tercera generación se derivan de la biomasa, mientras que los biocombustibles de cuarta generación aprovechan la biología sintética de algas y cianobacterias; recientemente, la producción de biocombustibles de segunda y tercera generación es ventajosa sobre los biocombustibles de primera, dado que se derivan de los residuos agrícolas y la biomasa de algas, respectivamente. La biomasa de algas es más abundante en la naturaleza, principalmente cultivada en varios tipos de fuentes de aguas residuales (Kumari *et al.*, 2018; Álvarez, 2009).

- Primera generación: los insumos son de procedencia agrícola conformados por las partes alimenticias de las plantas, las cuales tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites, así como las grasas animales, grasas y aceites de desecho provenientes de la cocción y elaboración de alimentos y desperdicios sólidos orgánicos.

- Segunda generación: residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa como el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallo, hojas y olote), paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, etc. La ventaja principal en la producción de estos biocombustibles es la inexistencia de desviaciones de alimentos provenientes de la agricultura hacia el sector energético.
- Tercera generación: vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les denomina “cultivos energéticos”. Entre estos vegetales están los pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido, y las algas verdes y verde azules.
- Cuarta generación: producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean anhídrido carbónico (CO₂) o alguna otra fuente de carbono para la obtención de los biocombustibles. A diferencia de las generaciones anteriores, en las que también se pueden emplear bacterias y organismos genéticamente modificados como insumo o para realizar alguna parte de los procesos, en la cuarta generación, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles. Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica (Kumari, *et al.*, 2018; Álvarez, 2009).

2.3. Procesos empleados para la producción de biocombustibles (biomasa)

Los procesos de conversión para la producción de biocombustibles se dividen respecto a su proceso tales son térmicos como la licuefacción, pirolisis, gasificación, combustión; los químicos como: hidrolisis, extracción con solvente, conversión (*greener router*); físicos son extracción mecánica, briquetaje, destilación; los biológicos como la fermentación, enzimático y la digestión anaerobia (figura 1).

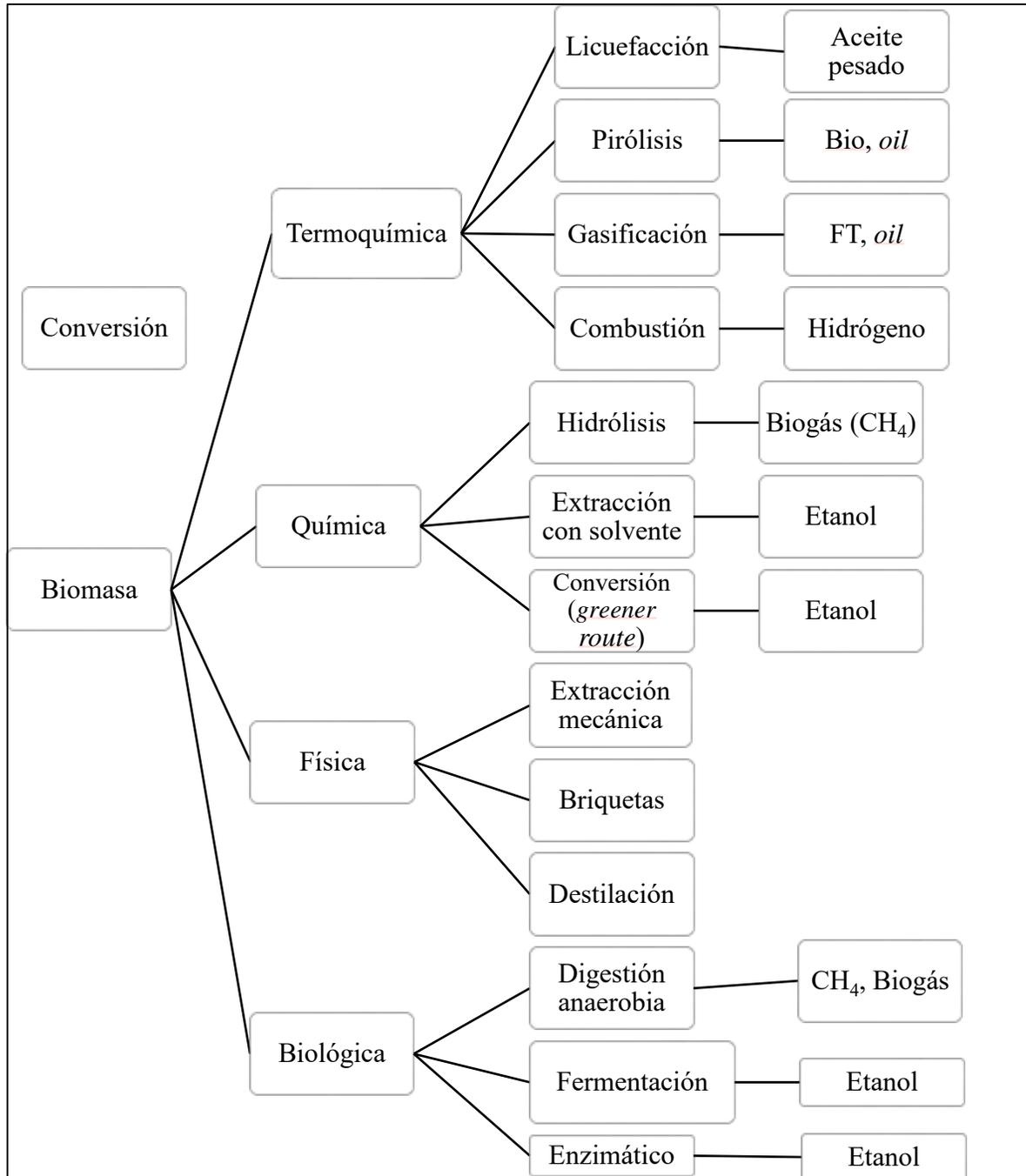


Figura 1. Procesos de conversión de biomasa (Naik *et al.*, 2010)

2.4. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia, es una serie de reacciones bioquímicas, a partir de diferentes poblaciones bacterianas (anaerobios - aerobios facultativos) las cuales descomponen el material biodegradable para producir biogás, que es una forma limpia de energía, que está compuesto principalmente de un 65% de metano, 35% de dióxido de carbono aproximadamente, a través de este proceso, se puede lograr la recuperación de energía y el control de la contaminación; por ejemplo los desechos agrícolas e industriales pueden ser sustrato para la digestión anaerobia porque contienen altos niveles de materiales fácilmente biodegradables, así como sus residuos de estos pueden ser usados como fertilizantes esto hace que sea una tecnología sostenible y rentable. (Li *et al.*, 2019; Aydin *et al.*, 2017). Las reacciones ocurren en forma secuencial y divididas en cuatro etapas hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (tabla 1) (Uddin *et al.*, 2019; García, 2012; Palomares, 2013).

Tabla 1. Etapas de la anaerobiosis y sus reacciones.

1	Hidrólisis	$(C_6H_{12}O_6)_n + H_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$	Hidrólisis de celulosa
2	Acidogénesis	- $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow C_4H_7O_2 + 2HCO_3^- + 3H + 2H_2$	Fermentación de glucosa a ácido butírico
3	Acetogénesis	$C_4H_7O_2 + 2HCO_3 + 2H_2O$ $\rightarrow 2CH_3COO^- + H + H_2$	Acetogénesis
4	Metanogénesis	$2CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^- + H^+$	Metanogénesis a partir de acetato
4	Metanogénesis	$HCO_3^- + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	Metanogénesis a partir de CO ₂ e H ₂

Fuente: Quintero Silva, 2010; García, 2012.

2.5. Etapas de la digestión anaerobia

2.5.1. Hidrólisis o licuefacción

En esta fase las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen en compuestos más simples, mediante la acción de enzimas extracelulares, secretadas por las bacterias Hidrolíticas (GRUPO I) se supone la ruptura de las macromoléculas orgánicas hasta subunidades pequeñas que puedan atravesar la pared celular (Alcántar González, 2014).

Así las proteínas son degradadas a aminoácidos, los polisacáridos a monómeros de azúcares y las grasas a polioles y ácidos grasos de cadena larga. La degradación de los polímeros depende de la naturaleza del inóculo empleado, pues las diferentes cepas de microorganismos hidrolíticos poseen determinadas enzimas o pueden llegar a inducir las (Quintero Silva, 2010).

2.5.2. Acidogénesis o Fermentación

En esta etapa de fermentación o acidogénesis por bacterias acidogénicas (GRUPO II) metabolizan los productos solubles de la hidrólisis en el interior celular y se obtienen compuestos de peso molecular intermedio siendo ácidos grasos de cadena corta como el ácido acético, fórmico, propiónico, butírico, butirato, láctico, valérico conocidos más como Ácidos Grasos Volátiles (AGV'S) y alcoholes, además de otros subproductos importantes para etapas posteriores; amoníaco, hidrógeno, dióxido de carbono, etc. (García, 2012). En esta etapa se encuentran activos más organismos en comparación con el resto de las etapas aproximadamente un 90% del total de los microorganismos involucrados en el proceso de digestión anaerobia son acidogénicos (Alcántar, 2014).

2.5.3. Acetogénesis

En la tercera etapa, conocida como acetogénesis, el resto de los productos acidogénesis, es decir, el ácido propiónico, ácido butírico y alcoholes son transformadas por las bacterias acetogénicas (GRUPO II) en dióxido de carbono e hidrógeno, y ácido acético (Rosenkranz, 2013). Esta etapa puede desarrollarse a partir de dos rutas diferentes.

1. Deshidrogenación acetogénica, que genera acetato a partir de otros ácidos grasos y algunos alcoholes. Como se indicó anteriormente, la formación de acetato depende de la concentración de H_2 existente, pero, además, la degradación del propionato a acetato se paraliza cuando existen concentraciones de H_2 del orden de 500-50,000 ppm en el biogás.
2. Hidrogenación acetogénica, algunos autores admiten la existencia de otras bacterias denominadas homoacetogénicas (GRUPO III), que pueden crecer autotróficamente con dióxido de carbono e hidrógeno para producir acetato (reacciones de hidrogenación acetogénica) cuando las metanogénicas utilizadoras de H_2 están inhibidas debido a un pH bajo. Así, se considera que el intercambio de hidrógeno es tan rápido en el digestor que originan diferentes microambientes con diferentes presiones de hidrógeno, donde ambas reacciones (acetogénicas y homoacetogénicas) se dan conjuntamente (Alcántar, 2014).

2.5.4. Metanogénesis

Etapa final del proceso de digestión anaerobia de la materia orgánica; donde la mayor parte de la energía química contenida en el sustrato es convertida en metano; a través de dos vías principales: metanogénesis hidrogenofílica y metanogénesis acetoclástica (Alcántar, 2014; Fernández, 2010). El desarrollo del proceso de producción de biogás depende del sustrato que se encuentre en mayor concentración en el medio proceso de tratamiento anaerobio.

1. La metanogénesis hidrogenofílica es realizada por bacterias metanogénicas hidrogenofílicas (GRUPO IV). Estas bacterias utilizan el hidrógeno como donador de electrones y el CO_2 como aceptor para producir metano (Metcalf, 2003). Esta vía contribuye con la generación de un 28% del metano de un proceso de tratamiento anaerobio (Caicedo, 2006; Quintero, 2010).
2. La metanogénesis acetoclástica es un proceso catabólico que contribuye en la generación del 72% del total del metano producido. En esta vía el acetato es convertido en metano. Los grupos de microorganismos implicados en la generación de metano a partir de acetato se conocen como bacterias metanogénicas acetoclásticas (GRUPO V) (Quintero, 2010).

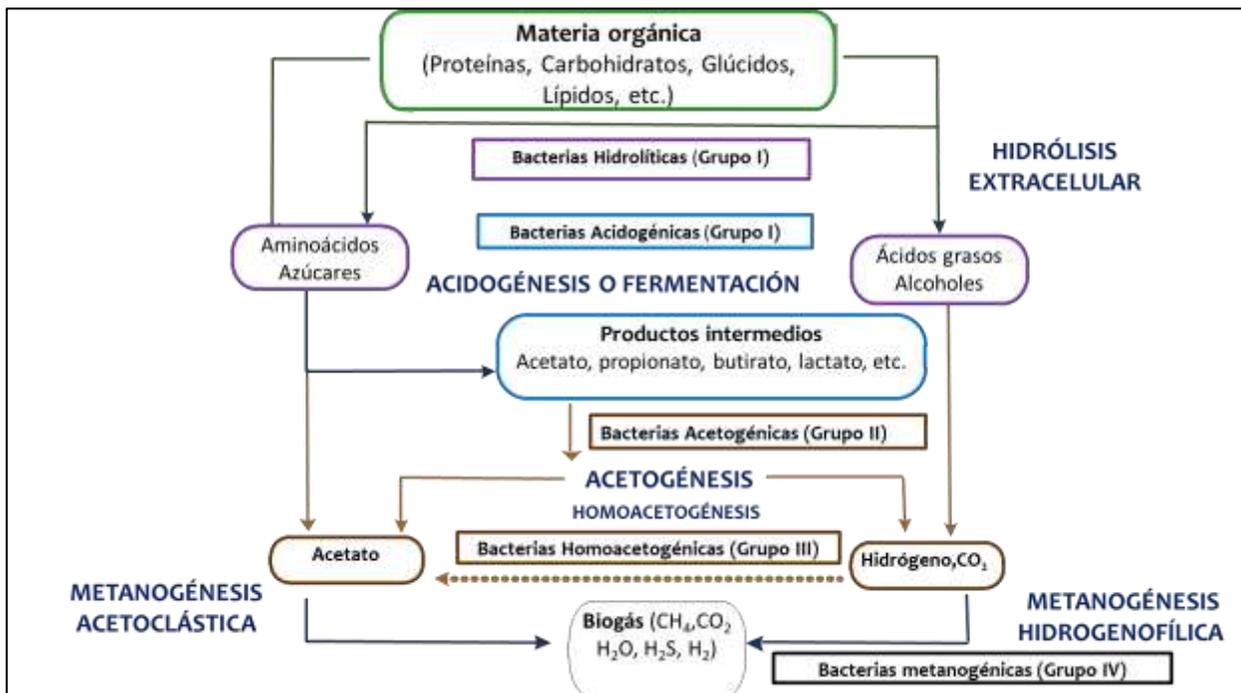


Figura 2. Digestión anaerobia. Etapas y grupos microbianos. Fuente: Sáenz, 2006.

2.6. Factores que influyen en el proceso anaerobio

Los principales factores que influyen en un proceso anaerobio para la obtención de biogás están relacionados con aquellos parámetros cuyo control permite un buen crecimiento de la biomasa, por consiguiente, una mayor eficiencia en la remoción de la materia orgánica (Verdezoto *et al.*, 2011). Por lo que es importante su conocimiento, para poder evitar cualquier falla en el proceso y tomar las medidas necesarias cuando así se requiera.

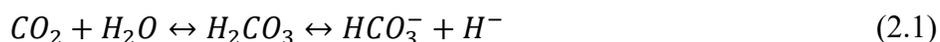
2.6.1. Temperatura

El efecto de la temperatura es de gran importancia para el desarrollo de los grupos de bacterias en la digestión anaerobia, debido a que esta altera la actividad de las enzimas, por tanto, varía la velocidad de crecimiento de las bacterias; hay tres principales intervalos de temperatura de funcionamiento, psicrófilo (<25° C), mesofílico (25° C–40° C) y termofílica (> 45° C). En general, los intervalos mesofílicos y termofílicos son más eficientes que los psicrófilicos en la digestión anaeróbica porque la baja temperatura no es propicia para el crecimiento (Li *et al.*, 2018; Zabranzca *et al.*, 2000).

2.6.2. Potencial de hidrógeno, pH

Cada uno de los grupos de bacterias, responsables de las diferentes etapas de la anaerobiosis, funcionan a un pH específico y favorable para su desarrollo; las bacterias fermentativas pueden sobrevivir en un intervalo de pH amplio entre valores de 4 a 9; a pesar de que el pH favorable es de alrededor de 5 a 6. En contraste, las bacterias metanogénicas presentan un rango de pH de supervivencia entre 6.0 y 8.5, pero se prefiere estar en la neutralidad; dado que los metanógenos son los microorganismos más sensibles y clave del proceso es necesario que el biorreactor este diseñado y operado en un intervalo de pH entre 7 y 8, debe tenerse en cuenta que una caída en el pH o la presencia de compuestos tóxicos afecta principalmente la actividad de los metanógenos; por ejemplo, mientras más formación de ácidos grasos volátiles, estos se inhibirán, fenómenos que pueden conducir a un mal funcionamiento del biorreactor (Ferreira, 2013; Jacuinde, 2018).

Los dos factores principales que afectan el pH son el ácido carbónico (H₂CO₃) y los AGV's. El pH y la capacidad tampón en un sistema anaerobio son completamente dependientes del equilibrio entre el gas carbónico (CO₂) y el ion bicarbonato que regula la concentración del ion hidrógeno como lo muestran las ecuaciones (2.1) y (2.2), (Pérez *et al.*, 2008; Rittmann *et al.*, 2001; Cajigas *et al.*, 2005).



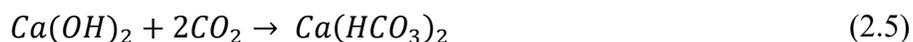
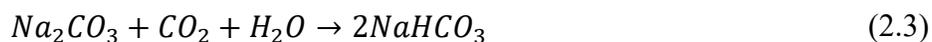


2.6.3. Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad buffer que tiene el sistema, esta debe ser suficiente para neutralizar los ácidos volátiles generados durante el metabolismo debido a que estos pueden llegar a acidificar el sistema e inhibir a las bacterias metanogénicas; en los digestores según la literatura se debe tener una alcalinidad entre 1,000 a 5,000 mg /L como carbonato de calcio, por otra parte es necesario que exista un equilibrio en la concentración de ácido carbónico debido que se está relacionada con el por ciento de CO₂, en el digestor la concentración del anión bicarbonato es aproximadamente equivalente a la alcalinidad total para muchas (Bajpai, 2017; Acosta *et al.*, 2005).

Alcalinidad bicarbonatada: Los que compuestos que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente son: NaHCO₃-, NH₄HCO₃ y los compuestos que deben reaccionar con el gas carbónico para formar alcalinidad bicarbonática son: NaOH, CaO, Ca (OH)₂.

La adición de iones hidroxilos (OH⁻) como los de la cal hidratada y el hidróxido de sodio no puede incrementar la alcalinidad bicarbonática sin reaccionar con el CO₂ soluble como lo muestran las 2 siguientes ecuaciones (2.3) (2.4) (2.5) (Pérez *et al.*, 2008; Rittmann *et al.*, 2001; Cajigas *et al.*, 2005):



2.6.4. Ácidos grasos volátiles (AGV's)

En los biorreactores la concentración de ácidos grasos volátiles totales es típicamente inferior a 500 mg/L como ácido acético. Sin embargo, si el digestor es de tamaño insuficiente para carga orgánica esta concentración puede ser mayor. A concentraciones de ácidos grasos volátiles más de 1500–2000 mg/L, la producción de biogás podría verse limitada por la inhibición. Sin embargo, en lugar de una concentración específica, es un aumento repentino y constante de volátiles Los ácidos grasos en el efluente pueden ser un signo de un trastorno digestivo. Por lo tanto, es importante controlar periódicamente los ácidos grasos volátiles para detectar problemas a tiempo, y realice los cambios operativos necesarios antes de que ocurra la falla del biorreactor (Bajpai, 2017; García, 2012).

2.6.5. Carga orgánica

La tasa de carga orgánica (TCO), es un parámetro importante porque indica la cantidad de sólidos volátiles para alimentar al reactor cada día, tiene grandes efectos en la eliminación de DQO y en el rendimiento durante periodos continuos de operación a largo plazo, por otra parte, se ha demostrado que la TCO afecta críticamente la actividad metanogénica debido al polímero extracelular contenido, velocidad de sedimentación y granulación de lodos (Chen *et al.*, 2020).

En caso de un largo tiempo de retención hidráulica, la sobrecarga puede dar como resultado un lavado de biomasa para biomasa no adherida que conducir al fracaso del proceso. Los sólidos volátiles representan una parte de los sólidos de material orgánico que pueden ser digeridos, mientras que el resto de los sólidos es fijo. Los sólidos "fijos" y una porción de los volátiles los sólidos no son biodegradables. La tasa de carga real depende de los tipos de desechos alimentados al reactor (Hassan *et al.*, 2015).

2.6.6. Nutrientes

A fin de continuar sus funciones vitales adecuadamente, un organismo debe tener una fuente de energía y de carbono para la síntesis de nueva materia celular. Los elementos inorgánicos, tales como el nitrógeno y el fósforo, y otros elementos que se encuentran a nivel de vestigios como el azufre, potasio, calcio y magnesio son también vitales para la síntesis celular (tabla 2) (Tchobanoglous, 1995).

Tabla 2. Requerimientos elementales de las bacterias productoras de metano.

Macronutrientes		Micronutrientes	
Elemento	Concentración $\frac{mg}{kg}$ células secas	Elemento	Concentración $\frac{mg}{kg}$ células secas
N	65	Fe	1.8
P	10	Ni	1.0
K	10	Co	7.5
S	10	Mo	6
Ca	4	Zn	6
Mg	3	Mn	20
		Cu	10

Fuente: Sherer 1983.

Los estudios realizados por Mendoza (2004), recomiendan el manejo de las relaciones C: N: P para sistemas anaerobios (tabla 3). Un número importante de autores plantearon estas relaciones para aumentar la eficiencia de estos sistemas.

Tabla 3. Relaciones C: N: P en reactores anaerobios.

Relaciones C: N: P	
DQO: N:P (Puñal, 2000)	100:7.2:1
DQO: N:P (Puñal, 2000)	100:0.7:1
DQO: N:P (Torres <i>et al.</i> , 2015)	350:5:1
DBO: N:P (Tchobanogluos <i>et al.</i> , 1995)	100:5:1

2.7. Biogás

Se suele denominar biogás a la mezcla gaseosa obtenida en la fermentación anaerobia de materia orgánica. Está compuesto principalmente por CH₄ (45%v – 70%v) y CO₂ (30%v – 45%v), así como por CO, O₂, H₂, H₂S, N₂, NH₃, y vapor de agua en proporciones variables, junto con trazas de decenas de otros compuestos (Osorio *et al.*, 2009).

El proceso de degradación de la materia orgánica mediante el cual se obtiene el biogás es conocido como digestión anaeróbica. Los rendimientos de este proceso se expresan habitualmente en metros cúbicos de gas por kilogramo de sólidos volátiles (SV) introducidos en el digester. Estos sólidos volátiles (sólidos gasificados durante un proceso de calcinación en mufla a 550° C ± 50° C hasta peso constante de la muestra) se corresponderían con la materia orgánica contenida en el sustrato.

De acuerdo con (Tchobanogluos *et al.*, 1995) la composición teórica del biogás obtenido a partir de un determinado compuesto orgánico podría obtenerse conforme a la siguiente reacción; en la Tabla 4 se muestran algunas aproximaciones según el sustrato.

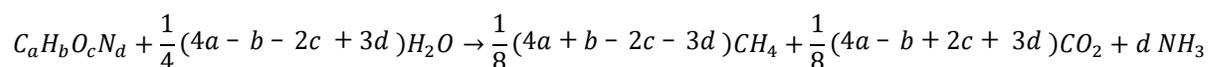


Tabla 4. Producción teórica de biogás a partir de diversos compuestos y composición.

Compuesto	Fórmula estequiométrica	Volumen de biogás (L kg ⁻¹)	Porcentaje (%)		
			CO ₂	CH ₄	NH ₃
Hexosas	C ₆ H ₁₂ O ₆	747	50	50	0
Celulosa	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	830	50	50	0
Proteínas	C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄ ⁽¹⁾	1273	39	41	20
Lípidos	C ₁₆ H ₃₂ O ₂ ⁽¹⁾	1400	28	72	0

Los usos potenciales del biogás se encuentran en la generación de electricidad y calor, no obstante existen pros y contras para estas aplicaciones, en el caso de la producción de energía eléctrica se requiere una alta inversión inicial, lo que hace muy baja la tasa de retorno, además las necesidades de espacios físicos son grandes, mientras que para la generación de calor el biogás es empleado como combustible en las calderas para producir vapor, requiere una baja inversión inicial lo que conlleva a una alta tasa de retorno, presentando también como ventaja que el diseño y la implementación no son muy complejos (Palomares, 2013).

2.8. Cactácea *Opuntia ficus indica* (nopal)

2.8.1. Origen, distribución y taxonomía de los nopales

El nopal es originario de América tropical y subtropical; sin embargo, actualmente se encuentra en condiciones agroclimáticas, silvestre o cultivada, en toda América, además, se han difundido a África, Asia, Europa y Oceanía. Pertenece a la familia Cactácea. La taxonomía es sumamente compleja debido a múltiples razones, entre otras porque sus fenotipos presentan gran variabilidad según las condiciones ambientales, se encuentran frecuentemente casos de poliploidía, se reproducen en forma sexual o asexual y existen numerosos híbridos interespecíficos (Sáenz, 2006).

2.8.2. Descripción de la planta

Uno de sus mayores atractivos es su anatomía y morfología adaptada a condiciones de fuerte estrés ambiental, por lo que son una alternativa de cultivo para regiones donde difícilmente crecen otras especies, la hacen adaptable al medio árido tienen relación con la conformación de

varios de sus órganos. Según Nobel (1998) sus raíces superficiales y extendidas captan el agua de las escasas lluvias que caen en esos ambientes.

Uno de los aspectos más importantes de esta planta es que presenta el llamado metabolismo ácido de las crasuláceas (conocido como CAM en sus siglas en inglés), lo que les permite reducir las pérdidas de agua a pesar de encontrarse generalmente en zonas cálidas y áridas. El nopal es una planta ideal para ser cultivada en zonas semiáridas de baja precipitación, donde puede crecer con una baja aportación de nutrientes y agua y dando lugar a altas productividades de biomasa. Puede ser cultivada en prácticamente cualquier tipo de suelo, incluyendo terrenos marginales (Orozco et al., 2018; Fernández *et al.*, 1990).

2.8.3. Composición fitoquímica y fisicoquímica del nopal

Entre los compuestos bioactivos que se encuentran en el nopal están los compuestos fenólicos particularmente flavonoides, aunque también se ha reportado la presencia de carotenos, ácido ascórbico, fitoesteroles y clorofila. Los nopales son considerados como una buena fuente de β -caroteno o provitamina A (11.3-53.5 $\mu\text{g}/100\text{g}$ de muestra fresca) y ácido ascórbico o vitamina C (7-22mg/ 100g de muestra fresca). En lo que respecta a la composición química de la porción comestible del nopal y los frutos de *Opuntia ficus-indica*, se pueden encontrar principalmente azúcares, proteínas y lípidos; algunos minerales incluyendo calcio, potasio y magnesio, fibra dietética además de otros importantes fitoquímicos. La fibra del nopal está integrada por celulosa, hemicelulosa, pectina, lignina y gomas. Esta composición varía en función de su edad y zona de cultivo, siendo los cladodios quienes tienen la mayor demanda desde el punto de vista industrial, considerando que cuando los brotes son jóvenes o tiernos (10-15 cm) se utilizan para la producción de nopal verdura o nopalitos para su comercialización en fresco, y cuando están parcialmente lignificados (cladodios de 2 a 3 años) son usados principalmente para la producción de harinas y productos deshidratados (Tabla 5) (Sáenz *et al.*, 2006).

Tabla 5. Composición química del nopal (*Opuntia* sp.) con base a 100 g de materia fresca y la fibra en peso seco.

Concepto	Contenido (g)	Compuestos funcionales	Contenido (g)
Humedad	88-95	Niacina	0.30-0.46
Carbohidratos	3-7	Ácido ascórbico	7-22
Cenizas	1-2	Fitomenadiona	5.3
Proteínas	0.5-1.7	Carotenos totales	11.3-53.5
Lípidos	0.2	Clorofila _{a+b}	11.52
Elementos	Contenido (g)	Fibras	g / 100 g (peso)

			seco)
Fósforo	16	Lignina	7-22
Potasio	257	Celulosa	9-19
Calcio	93	Hemicelulosa	4-10
Magnesio	52		
Hierro	1.6		
Manganeso	0.5		
Cobre	0.1		
Zinc	0.3		

Fuente: Blanco-Macías *et al.*, 2008; Aguilar-Sánchez *et al.*, 2007; Loayza y Chávez, 2007; Feugang *et. jal.*, 2006; Magallanes-Quintanar *et al.*, 2004; Rodríguez, 2006; Sáenz, 1997.

2.8.4. Estructura y composición de los principales polisacáridos presentes en el nopal

En el nopal el principal material constituyente de la pared celular es la fibra insoluble, en este se pueden encontrar polisacáridos como la celulosa, hemicelulosa, lignina. Mientras que en la fracción de fibra soluble se tienen pectinas y mucílago. Las concentraciones de estos componentes suelen variar, sus propiedades fisicoquímicas así dependen de factores como la especie y variedad del nopal, su edad y proceso de producción. Algunos reportes muestran la variabilidad de estos polisacáridos en el nopal (tabla 6) (Góngora, 2016).

Tabla 6. Polisacáridos estructurales de cinco especies de *Opuntia*.

Polisacáridos (g/100 g peso seco)	Especies				
	<i>O. streptacantha</i>	<i>O. hyptiacantha</i>	<i>O. megacantha</i>	<i>O. albicarpa</i>	<i>O. ficus indica</i>
Mucílago	7.18	8.47	7.40	6.89	11.75
Pectina	2.53	1.58	2.59	1.88	1.83
Hemicelulosa débilmente unida	8.65	6.32	7.89	4.89	4.59
Hemicelulosa fuertemente unida	3.70	2.38	3.18	1.63	2.30
Celulosa	4.89	5.47	4.63	5.25	5.49

Fuente: (Palacios *et al.*, 2012; Góngora, 2016)

2.9. Diseño experimental Taguchi

El diseño de experimentos, Taguchi es una técnica de diseño de experimentos que busca reducir considerablemente el número de experimentaciones mediante el uso del arreglo ortogonal. Es una

herramienta estadística presentada por Sir R. A. Fisher en Inglaterra en la década de los 20. El objetivo principal de esta herramienta es determinar los valores óptimos necesarios para llevar a cabo un proceso de manufactura, productivo, etc. Fisher dispuso de todas las combinaciones posibles fruto de la combinación de todas las variables presentes en el proceso, posteriormente Genichi Taguchi aportó una importante mejora sobre el diseño de experimentos de su antecesor (Stanziola, 2016).

El método Taguchi también es conocido como Diseño Robusto, Se dice que un proceso o producto es robusto si su funcionamiento no es afectado por factores de ruido que posteriormente se encuentra la señal ruido (S/N). Se trata de determinar los parámetros del proceso o producto con el fin de optimizar las características funcionales y tener una mínima sensibilidad al ruido (Krishnaiah *et al.*, 2012).

La razón S/N es considerada como valor característico de desempeño de cada corrida experimental, se busca maximizar el valor de la razón S/N para obtener las condiciones de operación más robustas. Las ecuaciones de los tres tipos de razón S/R se presentan a continuación (Gutiérrez Pulido *et al.*, 2008):

- Más pequeño es mejor
- Nominal es mejor
- Más grande es mejor

Los datos recolectados de los experimentos del arreglo ortogonal pueden ser analizados utilizando el método gráfico de respuesta (Navarrete, 2012).

2.10. Biochemical methane potential (*BMP*)

La prueba *BMP* o potencial bioquímico de metano (PBM), sirve para evaluar de forma rápida si un residuo puede ser correctamente degradado y así producir CH₄. El valor experimental está dado como mL CH₄/g SV adicionados al reactor. La biodegradabilidad de un sustrato está indicada por el rendimiento de CH₄, es decir, por el porcentaje de sólidos que se adicionan o destruyen durante la digestión anaerobia.

Sin embargo, no se ha definido un método estándar para determinar el BMP, diversos autores han propuesto procedimientos de ensayo para inferirlo al utilizar diferentes relaciones sustrato: inóculo (S: I) o al modificar las condiciones de temperatura, pH, tamaño de partícula del sustrato

y/o agitación (figura 3) (Lesteur *et al.*, 2010). Con base en lo anterior, en el presente trabajo se utilizan las relaciones sustrato: inóculo 1:2 y 1:3 para determinar al final del proceso cuál tendrá un mejor efecto en los resultados de *BMP* con la mezcla de residuos elegidos (Sánchez Reyes *et al.*, 2016).

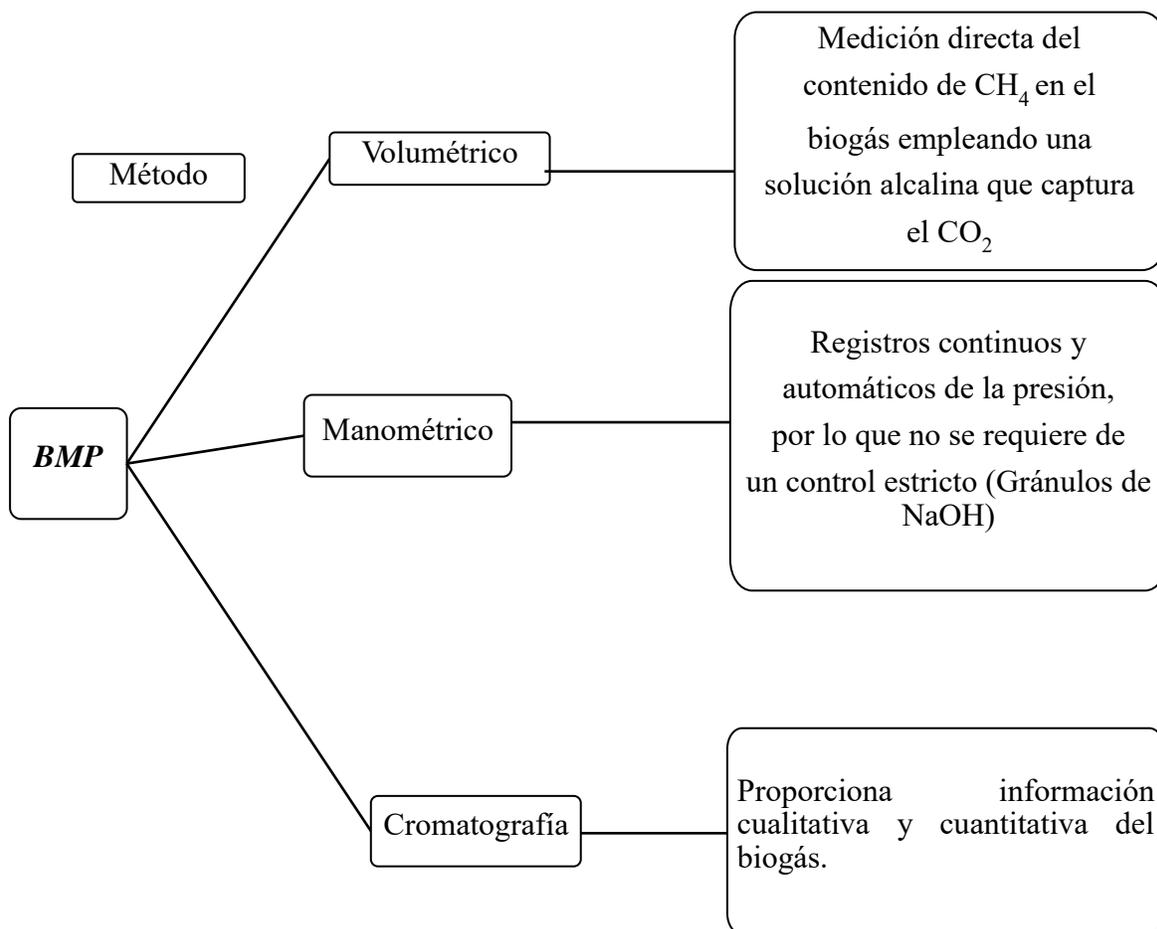


Figura 3. Métodos para medición en el sistema *BMP*.

2.11. Pretratamientos

La presencia de compuestos de lenta degradación que limitan el acceso a materiales más fácilmente degradables (como la lignina o los derivados de la esporopolenina), ha motivado la utilización de distintos pretratamientos para garantizar la biodisponibilidad de los sustratos y disminuir los tiempos de retención del proceso. Estos pretratamientos pueden ser similares o idénticos a los empleados en la obtención de bioetanol de segunda generación (explosión, tratamientos ácidos y alcalinos, empleo de microorganismos fibrolíticos) o más novedosos, como la utilización de microondas (Jackowiak *et al.*, 2009) o ultrasonidos para desestabilizar estructuras o agregados (Apul *et al.*, 2010).

En los últimos años, los investigadores han dedicado atención al pretratamiento en la biomasa para la producción de biogás debido a que se ha reconocido que es un paso esencial antes de la degradación. En general, los métodos de pretratamiento son: físicos, químicos, biológicos, combinados, no está en duda de que el pretratamiento tenga potencial para superar las desventajas cinéticas en la digestión anaerobia y aumentando la producción de biogás de biomasa lignocelulósica (Yua *et al.*, 2019; Kainthola *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2019).

Objetivos principales de un proceso de pretratamiento efectivo son (Kumari *et al.*, 2018):

1. Formación de azúcares directamente por hidrólisis,
2. Para evitar la pérdida o degradación de azúcares formados,
3. Para limitar la producción de productos inhibidores,
4. Para reducir las demandas de energía, y
5. Para minimizar el costo de producción de biocombustibles.

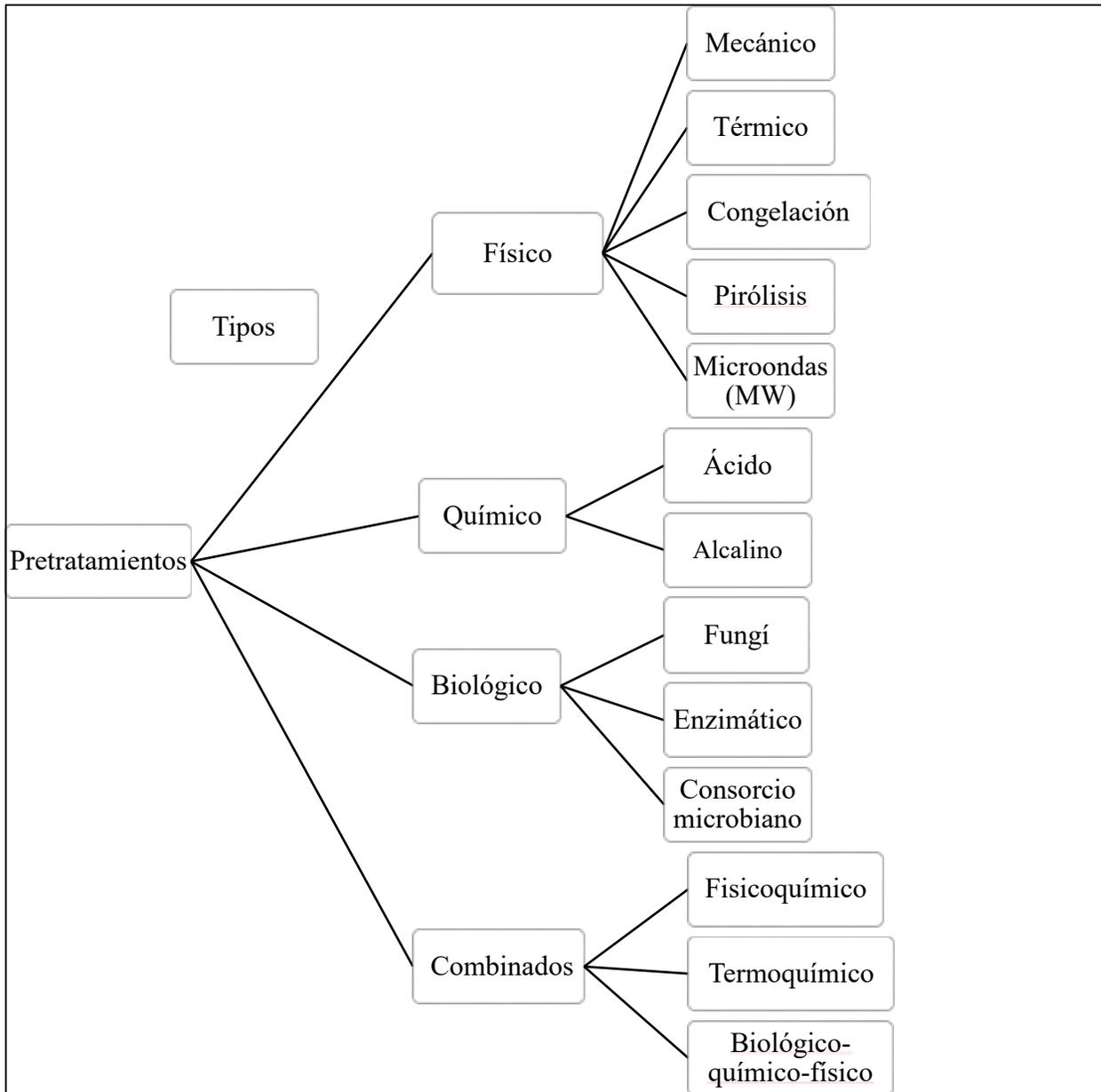


Figura 4. Procesos de conversión de biomasa (Naik *et al.*, 2010; Kumari *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2019).

2.11.1. Mecánico

Los pretratamientos físicos se suelen dividir en dos categorías; mecánicos y no mecánicos. Mecánicos, se utilizan las fuerzas de impacto y cizalladura, que conducen a materiales de baja cristalinidad, mayor superficie específica y densidad aparente más alta (Dekker, 1985). Entre estos pretratamientos, cabe mencionar diferentes tipos de molindas (molino de bolas, martillo,

cuchillas, rodillos), así como procesos de molienda e hidrólisis simultáneas (Negro, 2003). El proceso de la molienda húmeda permite separar en un medio acuoso los distintos componentes del sustrato, esto en carbohidratos, proteínas y lípidos.

2.11.2. Térmico

Los pretratamientos térmicos tienen dos funciones la primera es facilitar la degradación de algunas macromoléculas y solubilizar la materia orgánica (aumento de la biodisponibilidad) por otra parte, dependiendo de la temperatura y el tiempo, higienizar la materia orgánica para reducir o eliminar microorganismos indeseables. Existen diversas tecnologías que se diferencian en la forma de aplicar el calor; los pasteurizadores suelen aplicar el calor por conducción (recipientes encamisados), y otros métodos incluyen el uso de corrientes de vapor y/o de altas presiones (Pascual *et al.*, 2011).

Resulta evidente que la temperatura es un factor más importante que el ambiente químico, y que lo que se logra con eso, es el rompimiento de los enlaces de hidrógeno lo que hace la celulosa más accesible para la hidrólisis enzimática o ácida. Durante los procesos térmicos, parte de la hemicelulosa que es fácilmente hidrolizable, es transformada en ácidos y se asume que estas nuevas sustancias formadas son las encargadas de catalizar la hidrólisis de más hemicelulosa.

2.11.3. Químico

Los pretratamientos químicos rompen las macromoléculas poco biodegradables mediante la adición de compuestos químicos tales como ácidos o bases fuertes, o mediante otros métodos como la ozonización. Los pretratamientos químicos también pueden tener otros objetivos, como el ajuste de pH en el caso de sustratos ácidos, o el aumento de la capacidad tampón.

En sustratos lignocelulósicos, descomponen el enlace covalente de lignocelulosa para mejorar la degradación de la materia prima. Muchos métodos de pretratamiento químico, principalmente alcalinos y a menudo se adoptan tratamientos acidificantes. Este método puede aumentar la digestión de celulosa, hemicelulosa y lignina, y destruyen la cristalización de la paja.

2.11.4. Pretratamiento alcalino

El método de tratamiento alcalino donde se utiliza NaOH, Ca (OH)₂, KOH, urea o amoníaco en una solución llamada de remojo o pulverización sobre la superficie de la materia prima, para abrir

el enlace éster entre celulosa, hemicelulosa y lignina, y disolver parte de celulosa, hemicelulosa, lignina y silicato lo cual es ventajoso (figura 5).

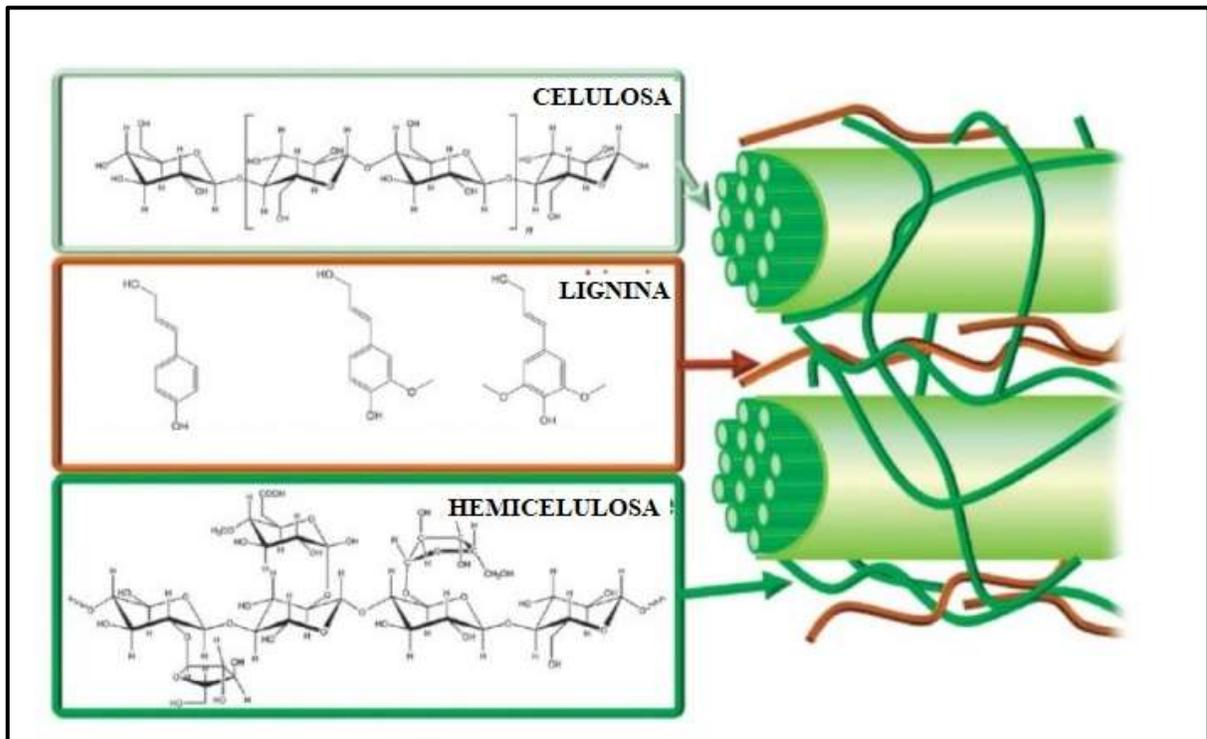


Figura 5. Componentes estructurales de materia lignocelulósica (Alonso *et al.*, 2012)

Capítulo III

METODOLOGÍA

3.1. Ubicación experimental

La evaluación de los pretratamientos en la cactácea *Opuntia ficus indica* se desarrollaron en las pruebas *BMP*, en el laboratorio de ingeniería ambiental y biotecnología, en la División de Estudios del Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, en la Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán.

3.2. Sustrato e inóculo

El sustrato se obtuvo de los residuos por podas del cultivo de la cactácea *Opuntia ficus indica*, de una plantación ubicada en el municipio Acuitzio del Canje de Michoacán y el inóculo de un reactor anaerobio de flujo ascendente (*UASB*) el cual es usado en un tren de tratamiento de aguas residuales de la industria restaurantera de la ciudad de Morelia Michoacán. El sustrato y el inóculo se caracterizaron mediante pruebas fisicoquímicas (tabla 7).

Tabla 7. Combinación de pretratamientos del diseño de experimentos Taguchi L₈.

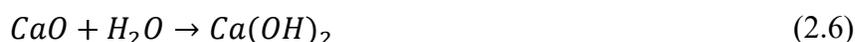
Combinación de pretratamiento Prueba	Mecánico (molienda)	Concentración (carga orgánica) (mg/L)	Químico (pH)	Térmico (° C)
1	Gruesa	15,000	6	30
2	Gruesa	15,000	8.5	40
3	Gruesa	30,000	6	40
4	Gruesa	30,000	8.5	30
5	Fina	15,000	6	40
6	Fina	15,000	8.5	30
7	Fina	30,000	6	30
8	Fina	30,000	8.5	40
9	Troceado	30,000	-	-
10	Inóculo	-	-	-

3.3. Pretratamiento del sustrato cactácea *Opuntia ficus indica*

- Mecánico: el pretratamiento consistió en la molienda del sustrato con dos tipos de molinos diferentes. La molienda gruesa se obtuvo con un molino de discos (molino 1)

marca estrella, con apertura entre los discos de 0.8 mm, la molienda fina se realizó con una licuadora marca Oster modelo BEST02-E01, con una potencia de 600 watt y tiempo de molienda de 10 minutos.

- **Concentración:** en este pretratamiento se controló la concentración inicial de la carga orgánica, la cual fue medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO); las concentraciones que se establecieron fueron de 15, 000 mg L⁻¹ y 30, 000 mgL⁻¹ de DQO.
- **Térmico:** el pretratamiento térmico consistió en elevar la temperatura del agua de dilución a 30° C y 40° C.
- **Químico:** el pretratamiento usado fue un tipo alcalino debido a que se adicionó el agente CaO (Ca (OH)₂) (Ec.2.6), para el ajuste de pH a valores de 6 y de 8.5.



3.4. Diseño de experimento Taguchi L₈

El diseño de experimento que se realizó fue un diseño ortogonal Taguchi L₈, el cual constó de cuatro factores y dos niveles, así como dos tratamientos como testigos (tabla 8).

Tabla 8. Diseño de experimentos Taguchi L₈ para el pretratamiento del sustrato.

Factor	Parámetro	Nivel bajo	Nivel alto
Mecánico	Molienda	Gruesa (Molino)	Fina (Licuadora)
Concentración	DQO (mg/L)	15,000	30,000
Químico	pH	6	8.5
Térmico	° C	30	40

3.5. Ensayos BMP

El sistema *BMP* consistió de reactores por lotes, de 500 mL (frasco *Schott*), con tapa de polipropileno adaptada para la salida de biogás y volumen de trabajo de 40%, con relación 50/50 de inóculo y sustrato; la medición del biogás se realizó por desplazamiento de volumen en una botella de polipropileno de un litro sellada herméticamente (figura 6). El sistema se mantuvo a condiciones mesofílicas (35° C) en una incubadora marca *Thermo Scientific* modelo *Heratherm* por 30 días.

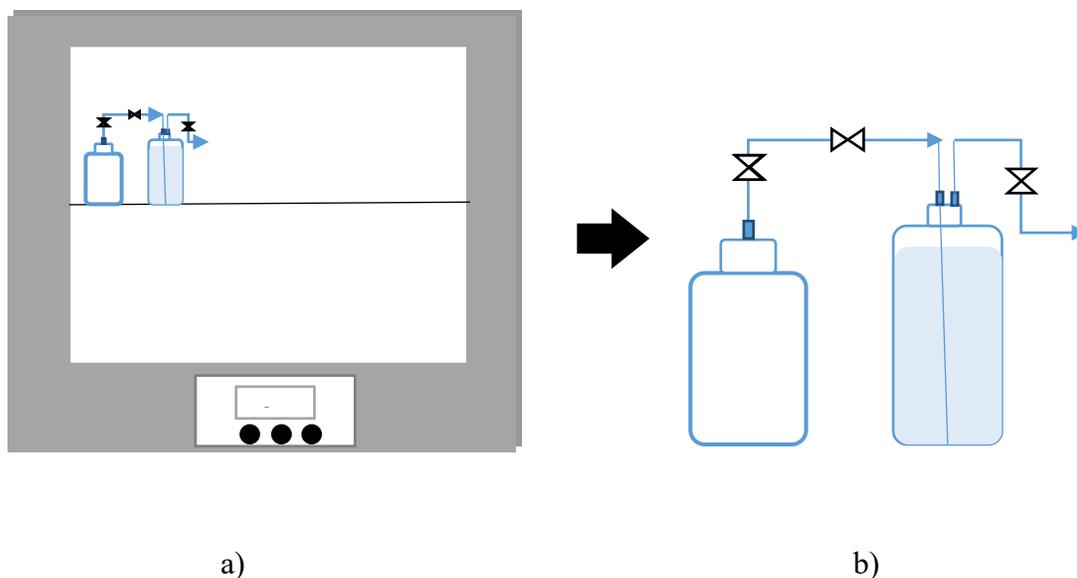


Figura 6. a) Sistema *BMP* (volumétrico), b) Reactor y captador de biogás.

3.6. Métodos analíticos

Se realizó la caracterización fisicoquímica del inóculo y del sustrato (tabla 9). Los parámetros fueron: DQO (Demanda Química de Oxígeno) con el método 8000 HACH, temperatura con la norma NMX-AA-007-SCFI-2013, pH con la NMX-AA-008-SCFI-2000, alcalinidad NMX-AA-036-SCFI-2001, Nitrógeno Total (NT) método 8075 HACH, Fósforo Total (PT) método HACH 10127, Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Volátiles (STV), Sólidos Suspendedos Totales (SST) Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV) a partir de la norma NMX-AA-034-SCFI-2015.

Tabla 9. Métodos y normas para parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Método/Norma
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	8000 HACH
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001,
Nitrógeno Total (NT)	8075 HACH
Fósforo Total (PT)	10127 HACH
Ácidos grasos volátiles	HACH
Sólidos (SSV, ST, SST, STV)	NMX-AA-034-SCFI-2015.

3.7. Análisis de la composición de biogás

La medición del porcentaje de metano en el biogás se realizó en un cromatógrafo de gases *BUCK Scientific*, con detectores de ionización de flama (*FID*) y conductividad térmica (*TCD*), y columna empacada con sílica gel en tubo de acero inoxidable de 1 metro de longitud y 1/8" de diámetro. Las condiciones de operación fueron la temperatura del horno a 100° C a 200° C, del detector *FID* 150° C-200° C y del *TCD* 100° C-130° C.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico, se implementó con la finalidad de obtener la combinación de los pretratamientos para la generación y calidad del biogás.

Los resultados obtenidos de los experimentos se analizaron con el software Minitab 17®, a fin de determinar la diferencia significativa la producción de biogás y de metano en función de los pretratamientos aplicados.

Capítulo IV

RESULTADOS Y

DISCUSIÓN

En este Capítulo se discuten los resultados más importantes obtenidos en el proyecto. La primera sección caracteriza fisicoquímicamente el sustrato y el inóculo. En la segunda sección se analizan y discuten los parámetros físicos y químicos de los pretratamientos combinados que se le suministraron al sustrato. La tercera sección describe la construcción del sistema de análisis del potencial de producción de biogás (*BMP*), seguida por el análisis del comportamiento fisicoquímico de los a los que se les suministraron mezclas de pretratamientos en la cuarta sección. La producción de biogás a partir de la influencia de los pretratamientos sobre su cantidad y calidad se discute en la quinta sección, en función del diseño de experimentos Taguchi L_8 , finalizando con el análisis estadístico de la relación entre factores y respuestas de estos experimentos.

4.1. Sustrato e inóculo

El sustrato se tomó de los residuos por podas del cultivo de la cactácea *Opuntia ficus indica* (nopal), de una plantación ubicada en el municipio Acuitzio del Canje, Michoacán (Figura 6a). El inóculo provino de un reactor UASB, el cual es usado en un tren de tratamiento de aguas residuales de la industria restaurantera de la ciudad de Morelia, Michoacán (Figura 6b).

a)



b)



Figura 7. a) cactácea *Opuntia ficus indica*, b) inóculo.

4.1.1. Caracterización fisicoquímica del sustrato

Los parámetros fisicoquímicos obtenidos del sustrato (penca cactácea *Opuntia ficus indica*), se encuentran en la Tabla 10, y muestran que, en general, éste se encuentra fuera de las condiciones para que se lleve a cabo el proceso directo de digestión anaerobia. Por ejemplo, el pH exhibió el valor de 4.7, mientras que lo recomendado es de 6 a 8 (Godoy, 2012; y Shi *et al.*, 2014); en muchos casos si el pH es demasiado alto o bajo, el crecimiento y el desarrollo de los grupos de bacterias pueden ser inhibidos (Franke *et al.*, 2014; Gómez *et al.*, 2014). Dos grupos de bacterias especialmente sensibles son el grupo de metanógenos, cuyo pH ideal es alrededor de 7, y el grupo de las bacterias acidogénicas, cuyo pH ideal es de 5.5 a 6.5 (Sawatdeenarunat *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2018).

Tabla 10. Caracterización del sustrato.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
pH	4.76
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	1,200
Humedad (%)	93.5
Conductividad (mS/cm)	7.004
DQO (mg/L)	60,367
DQOs (mg/L)	32,450
AGV'S (mg/L)	727
ST (mg/L)	55,013.33
STV (mg/L)	40,033.33
SST (mg/L)	49,266.67
SSV (mg/L)	38,333.33
PO³⁻⁴ (mg/L)	396.33 (129.32 P)
N (mg/L)	1025
Relación C/N/P	466.80/7.9/1

Similarmente, los valores de alcalinidad (Tabla 10) se encontraron alrededor de 1,200 mg CaCO₃/L, los cuales son bajos comparados con lo reportado (García, 2012), donde recomiendan que el valor debe estar arriba de los 2,000 mg CaCO₃/L.

La Tasa de Carga Orgánica (TCO) se midió indirectamente a partir de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), exhibiendo el valor 60,367 mg DQO/L (Tabla 10). Este valor se encuentra por

encima de los intervalos recomendados, puesto que valores superiores a 35,000 mg DQO/L pueden provocar la acidificación del reactor (Jacuinde, 2017; Alanís 2017).

La relación C/N/P es importante debido a que son nutrientes necesarios para que los grupos de bacterias se desarrollen adecuadamente, para sus funciones vitales y para que se lleve la simbiosis de manera estable. En cuanto al valor la relación C/N/P, 466.80/7.9/1 (Tabla 10), en este trabajo se encontró que el fósforo estaba abajo de lo reportado. Según Puñal (2000), esta relación se recomienda como 100/7.2/1, que en comparación con este caso contiene 4.7 veces la proporción de fósforo, y lo único que diferencia a sus muestras es la cantidad de materia orgánica; Torres y Lozada (2015) recomiendan que la relación C/N/P sea 350/5/1, lo que supera el contenido de fósforo en 1.5 veces comparado con este sustrato.

4.1.2. Caracterización del inóculo

La finalidad de la caracterización fue encontrar la composición fisicoquímica del inóculo (Tabla 11) para estimar su factibilidad para ser usado el proceso efectivo de digestión anaerobia.

Tabla 11. Caracterización del inóculo.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
pH	6.98
Humedad (%)	94.65
Conductividad (mS/cm)	3.168
DQO (mg/L)	64,000.00
AGV's (mg/L)	916.00
ST (mg/L)	50,786.67
STV (mg/L)	38,026.67
SST (mg/L)	44,446.67
SSV (mg/L)	33,400.00
PO³⁻⁴ (mg/L)	-
N (mg/L)	1,500.00

Entre los parámetros más importantes, el pH se encontró en 6.98. Según Fajardo (1997), este valor está por debajo del intervalo recomendado de 7 a 7.8; sin embargo, Ferreira (2013) reporta que valores de pH de 6 a 8.5 en el reactor, mantienen a todos los consorcios estables, tal que pueden llevar a cabo su desarrollo y funciones vitales. Por tanto, el valor de pH del inóculo se consideró apto para el proceso efectivo de digestión anaerobia.

El valor de la conductividad eléctrica se encontró en 3.168 mS/cm (este parámetro está asociado a la cantidad de ácidos orgánicos disociados, producto de la degradación de la materia orgánica en condiciones anóxicas (nitratos o sulfatos (NO_3^- , SO_4^{2-})). Además, los valores de la conductividad eléctrica también son indicativos de la concentración de sales y sólidos disueltos totales. El valor exhibido por el inóculo se encontró por debajo del intervalo que recomienda Alanís (2017), de 4 mS/cm a 10 mS/cm; sin embargo, Li *et al.* (2018) trabajaron en un intervalo de conductividad de 1.74 $\mu\text{S/cm}$ a 2.98 $\mu\text{S/cm}$ con buenos resultados en la obtención de metano.

Adicionalmente se midió el contenido de sólidos solubles volátiles (SSV), ya que es una forma indirecta de cuantificar microorganismos presentes en el inóculo. El valor que se registró fue 33,4000 mg/L, el cual estuvo arriba de lo recomendado (Li *et al.*, 2020; Lettinga *et al.*, 1980), que es de 10,000 mg/L a 15,0000 mg/L.

4.1.3. Parámetros de viabilidad del inóculo

Algunos parámetros de viabilidad del inóculo son (Tabla 12) necesarios para determinar la capacidad amortiguadora que tendrá el sistema debido a cambios de pH y producción de ácidos grasos volátiles (AGV's). Se encontró que los valores medidos eran favorables para llevar a cabo la digestión anaerobia, por lo que el arranque de las pruebas *BMP* se llevó a cabo sin estabilizar al inóculo.

Tabla 12. Parámetros de viabilidad del inóculo.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Alcalinidad CaCO_3 (mg/L)	4,500
Relación alfa (α)	0.57
STV/ST	0.65

El valor de alcalinidad como equivalente a una solución de carbonato de calcio se encontró en 4,000 mg CaCO_3/L , que está en el intervalo recomendado en trabajos reportados (Alanís, 2017; Bajpai, 2017) que indican que debe estar de 1000 mg CaCO_3/L a 5000 mg CaCO_3/L . Sin embargo, otros autores reportan que la alcalinidad debe estar arriba de 12,000 mg CaCO_3/L (Palomares, 2013; Jacuinde, 2018), por lo que, al observar el valor intermedio en este inóculo, se le consideró apto para la fermentación.

Según la literatura, la relación alfa (α) debe ser superior a 0.75 (Pérez *et al.*, 2009); sin embargo, García (2012) trabajó con un inóculo que exhibía una relación de 0.65 y tuvo resultados favorables en su sistema. Para el inóculo utilizado, la relación alfa (α) exhibió el valor 0.57,

ligeramente arriba del recomendado (Jacuinde,2018; Alanís, 2017) que es 0.5; por lo que, al observar el valor intermedio en este inóculo, se le consideró apto para la fermentación.

Finalmente, se estimó la relación STV/ST, cuyo valor fue 0.65. Esta relación es un indicador indirecto sobre el inicio del arranque de un reactor anaerobio o de la prueba *BMP*, dado que permite evaluar indirectamente los microorganismos activos. El valor intermedio observado en este inóculo, permite considerarlo apto para la fermentación (García, 2012).

4.2. Parámetros fisicoquímicos de los pretratamientos combinados

En el proceso para llevar a cabo las combinaciones de los pretratamientos (Tabla 13). Se comenzó con el pretratamiento mecánico, con la aplicación de dos moliendas, la gruesa se obtuvo a partir del molino de discos, con abertura de 0.8 mm, en la cual se obtuvieron tamaños de partícula irregulares, tanto a lo ancho como a lo largo, de 0.8 a 10 mm. En la molienda fina, la cual se realizó en una licuadora por 15 minutos, se obtuvo un intervalo tamaño de partícula de 0.1 mm a 0.2 mm. Posteriormente se realizaron de manera simultánea el pretratamiento químico y el térmico, debido a que el agua de las diluciones (a partir de la DQO inicial de la penca de nopal) se varió a 30° C y 40° C, dependiendo de la prueba, finalmente se agregó la cantidad de CaO en las diluciones hasta ajustar el pH a 6 y 8.5.

Tabla 13. Pretratamientos y parámetros fisicoquímicos de las pruebas del diseño Taguchi L₈.

Prueba	Pretratamientos			Parámetros fisicoquímicos				
	Físico Mecánico (mm ^a /cm ^b)	Químico (pH) (Alcalino)	Térmico (° C)	Concentración (mg /L DQO)	DQO _s (mg/L)	AGV's (mg/L)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Conductividad (mS/cm)
1	0.8-10 ^a	6.18	31	14,500	8,700	500	1,750	2.66
2	0.8-10 ^a	8.57	41	14,800	6,300	482	1,350	3.22
3	0.8-10 ^a	5.28	40	29,400	15,900	427	1,850	3.26
4	0.8-10 ^a	7.31	30	30,200	18,800	779	2,300	4.79
5	0.1-0.2 ^b	6.12	41.3	14,500	9,900	819	1,250	2.90
6	0.1-0.2 ^b	8.51	31	14,800	10,100	830	1,100	2.80
7	0.1-0.2 ^b	5.9	31	29,400	17,300	873	2,600	5.13
8	0.1-0.2 ^b	8.65	39	30,200	17,500	864	2,200	5.21
9	3 ^b	4.3	23	30,200	9,350	916	1,200	7.01
10	--	6.94	22.1	64,000	--	--	3,000	3.17

Las combinaciones de los pretratamientos (Tabla 13), se realizaron mediante variaciones respecto al experimento original, tal fue el caso del pretratamiento químico con la molienda gruesa, el agente químico (CaO) floculo al interactuar con el mucilago y esto provoco que el pH, no se ajustara correctamente, sin embargo, la cantidad de CaO fue equivalente a la que se empleó en la molienda fina donde no existió una variación significativa.

En el caso de la concentración la variación no fue significativa, ya que del 100% representado por 15,000 y 30,000 mg/L DQO, estas estuvieron en los intervalos del 97-98% de la concentración inicial.

Por otra parte, los parámetros fisicoquímicos realizados después de los pretratamientos implementados en el nopal fueron:

Los AGV's iniciales en el sustrato sin la combinación de pretratamientos fue de 916 mg/L, posteriormente con la combinación de pretratamientos bajaron debido a que en el pretratamiento químico el agente actuó como base formando sales y al bajar esto se relaciona con el incremento de alcalinidad, con esto tanto los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad entraron dentro los intervalos que maneja la literatura (1500–2000 mg/L y 1,000 a 5,000 mg /L como carbonato de calcio) (Bajpai, 2017; Acosta et al., 2005; García, 2012), la conductividad bajo sin embargo fue debido a las diluciones que se realizaron y en el caso de las pruebas 1,2,3,5 y 6 las cuales se encontraron por debajo de lo que marca la literatura la cual es de 4-10 mS/cm (Alanís, 2017).

Finalmente, la Demanda Química Soluble (DQOs), es un parámetro necesario, debido a que indica indirectamente, el alimento directo para los consorcios microbianos (Pire *et al.*, 2011), la cual fue diferente para cada prueba, en la prueba 1 de la DQO_T, el 60% era DQOs, prueba 2 el 43% era DQOs, prueba 3 el 54% era DQOs, prueba 4 el 62% era DQOs, prueba 5 el 68% era DQOs, prueba 6 el 68% era DQOs, prueba 7 el 59% era DQOs, prueba 8 el 58% era DQOs, prueba 9 el 31 % era DQOs esta DQOs, en comparación con el nopal troceado que este solo tenía el 31% de DQOs, en este caso el efecto de los pretratamientos fue favorable.

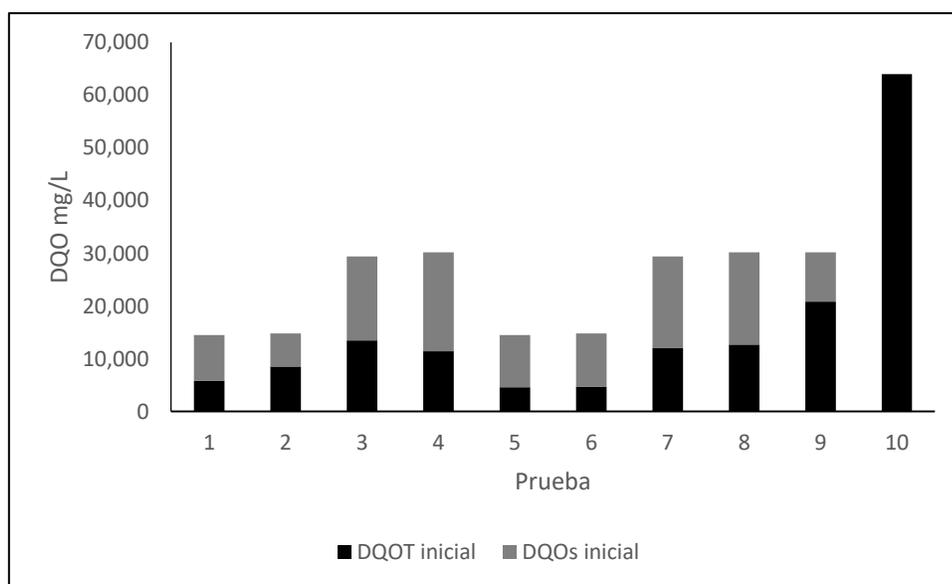


Figura 8. Relación de DQO_T y DQO_S del sustrato.

4.3. Construcción del sistema *BMP*

El sistema *BMP* (Figura 9) consistió de reactores por lotes, de 500 mL (frasco *Schott*), con tapa de polipropileno adaptada para la salida de biogás, y volumen de trabajo de 40%, alimentado con una relación de inóculo y sustrato 50/50. La medición del biogás producido se realizó por desplazamiento del volumen de agua en una botella de polipropileno de 1 L, sellada herméticamente. El sistema se mantuvo en condiciones mesofílicas (35° C) en una incubadora marca *Thermo Scientific* modelo *Heratherm* por 30 días.



Figura 9. Sistema *BMP* (volumétrico).

4.4. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en la mezcla de la prueba *BMP*

4.4.1. Comportamiento del pH inicial y final

El pH de las mezclas iniciales se encontró en el intervalo de 6.65 a 7.5, debido a la dilución en el momento de mezclado, de acuerdo a esto se encontró dentro de los intervalos favorables para los consorcios bacterianos que es en 6 a 7.5 (Rodríguez, 2013), después de finalizar las pruebas el pH en algunas pruebas este se mantuvo constante como en la prueba 1, en las pruebas 2 y 4 el pH se elevó sólo 0.20, en las demás pruebas bajo en un intervalo de 6.5 a 7.1, se puede decir que existió un equilibrio entre el gas carbónico (CO_2) y el ion bicarbonato que regula la concentración del ion hidrógeno, como se observa los cambios de pH no fueron bruscos debido a que el sistema contó con una capacidad amortiguadora suficiente para poder mantener un pH que favoreció a todas las poblaciones microbianas (figura 10).

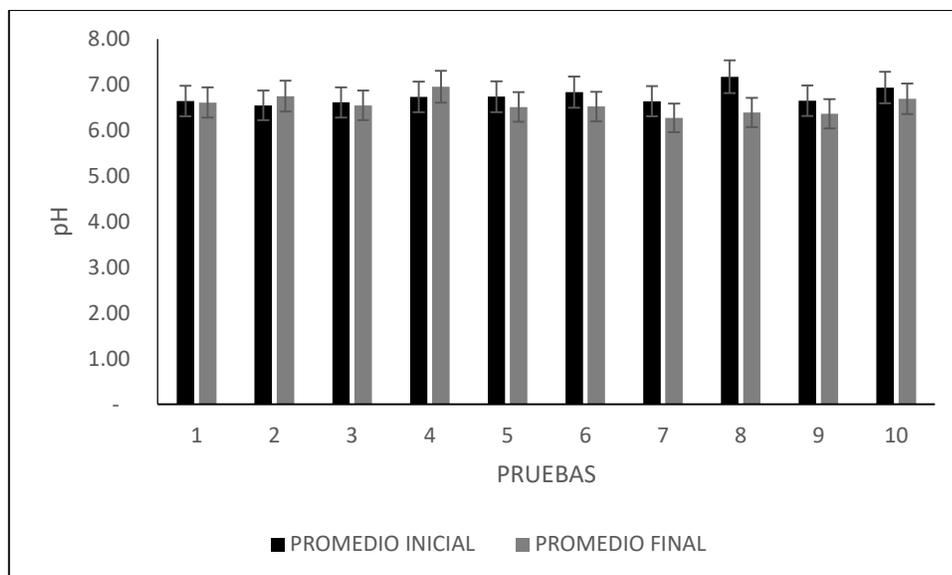


Figura 10. Comportamiento del pH inicial y final en la prueba *BMP*.

4.4.2. Comportamiento inicial y final de la conductividad

Las mezclas que se prepararon a concentración de 15,000 mg DQO /L, las cuales son 1,2,5,6, exhibieron conductividad inicial en el intervalo de 3.2 mS/cm a 3.30 mS/cm, y las que se prepararon a concentración de 30, 000 mg DQO /L exhibieron conductividad inicial en el intervalo de 4 mS/cm a 4.5 mS/cm (Figura 11). Al final de las pruebas la conductividad subió; probablemente debido a que en el sistema aumento la cantidad de ácidos orgánicos disociados, productos de la degradación de la materia orgánica a condiciones anóxicas (nitratos o sulfatos (NO_3^- , SO_4^{2-})). Asimismo, estos valores son indicativos de la concentración de salinidad y sólidos disueltos totales.

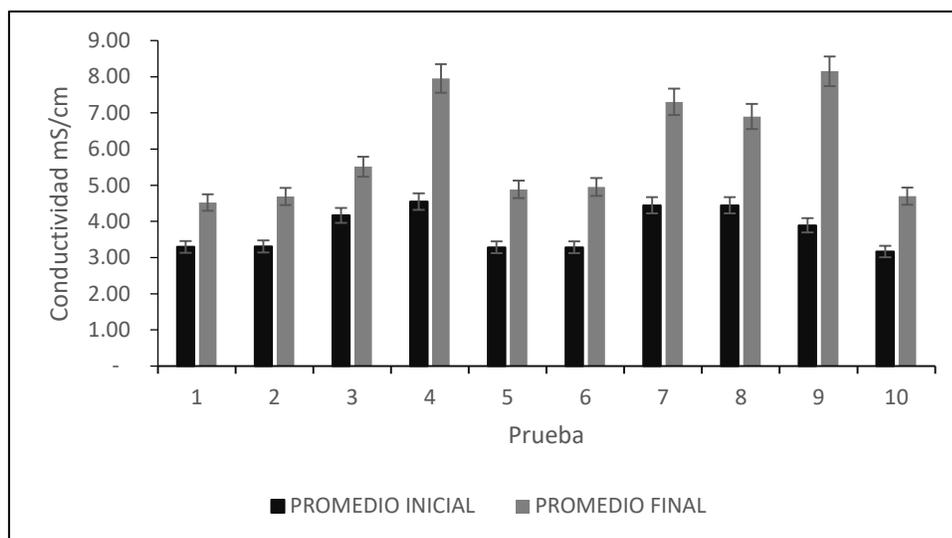


Figura 11. Comportamiento inicial y final de la conductividad.

4.4.3. Comportamiento inicial y final de la alcalinidad

La alcalinidad es un parámetro importante de control del proceso debido que presenta la capacidad de neutralizar la acidez en el sistema; en estos experimentos, el valor inicial de la alcalinidad en el inóculo fue de 4,500 mg CaCO₃ / L, la cual se encontró dentro de los intervalos recomendados de 1000 mg CaCO₃ / L a 5000 mg CaCO₃ / L (Bajpai, 2017;). Una vez que se realizó la mezcla del sustrato (pre- tratado) con el inóculo, la alcalinidad bajo debido a la dilución que existió al mezclarse; sin embargo, las pruebas se mantuvieron dentro del intervalo recomendado, exhibiendo valores de 1000 mg CaCO₃ / L a 2,200 mg CaCO₃ / L. Al finalizar la prueba *BMP* la alcalinidad incrementó debido a su probable equilibrio con los ácidos grasos volátiles, así como el equilibrio con la disociación del ácido carbónico que tiende a regular la concentración del ion hidrógeno (Cajigas *et al.*, 2010). También existe la probabilidad de la disociación del CO₂ con el hidróxido de calcio, aumentando el contenido de CaCO₃ y a su vez la capacidad amortiguadora en el sistema, lo que evita la acidificación del sistema. Finalmente, se puede observar que en la prueba 10, el testigo que contenía solo inóculo, la alcalinidad bajo a 2,400 mg CaCO₃/L, que de igual manera se encontró dentro del intervalo de valores recomendados (Figura 12).

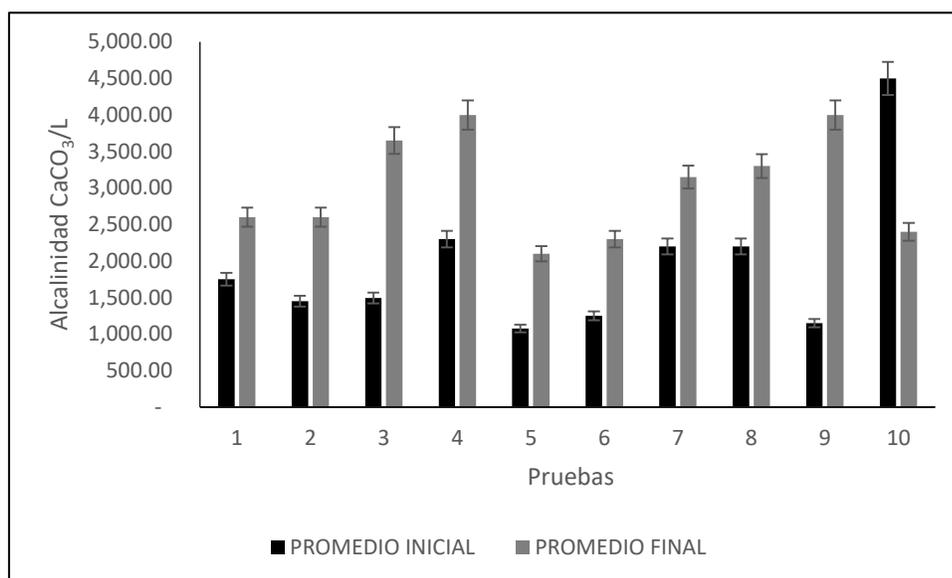


Figura 12. Comportamiento inicial y final de la alcalinidad.

4.4.4. Comportamiento inicial y final de los AGV's

Inicialmente, los AGV's, se encontraron en concentraciones de 600 mg/L a 1,450 mg/L; sin embargo, en la literatura se recomienda que las concentraciones de AGV's deben ser inferiores al equivalente de 500 mg/L como ácido acético (Bajpai, 2017), pero globales según la literatura deben estar 1500–2000 mg/L (Garcia, 2012). En las pruebas que se encontraron dentro de los valores recomendados, sin embargo, al final de la prueba los AGV's incrementaron considerablemente, con concentraciones de 950 mg/L a 2,300 mg/L, de lo que podemos ver que ligeramente las pruebas 3,4 y 7 rebasaron el valor anteriormente mencionados.

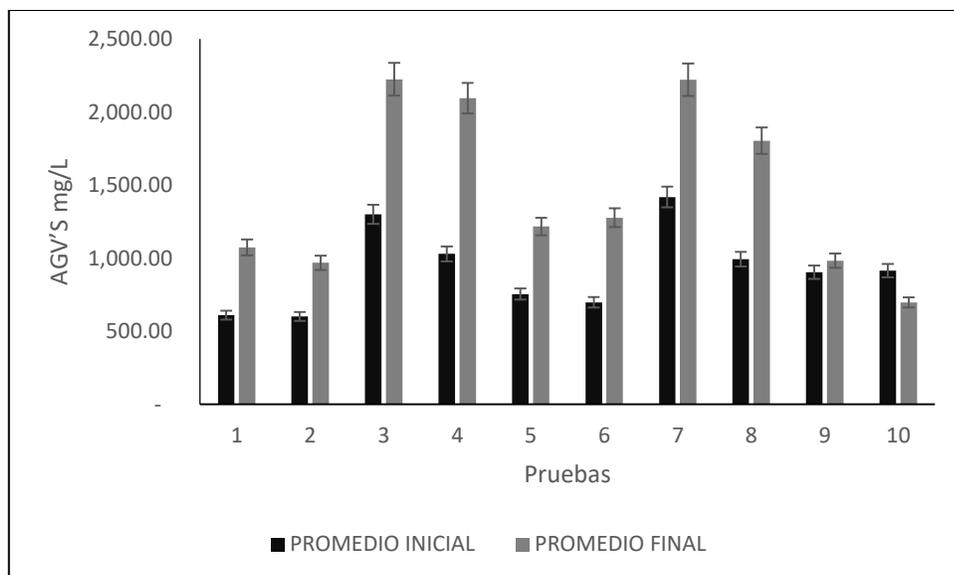


Figura 13. Comportamiento inicial y final de la AGV's.

4.4.5. Comportamiento inicial y final de la DQO

Las concentraciones iniciales de DQO en la prueba *BMP* se situaron en valores de 39,000 mg DQO/L a 64,000 mg DQO/L, y al final se situaron en valores de 27,000 mg DQO/L a 55,000 mg DQO/L, la disminución de la DQO de mezcla se debió al consumo del sustrato convertido en biogás (Figura 14).

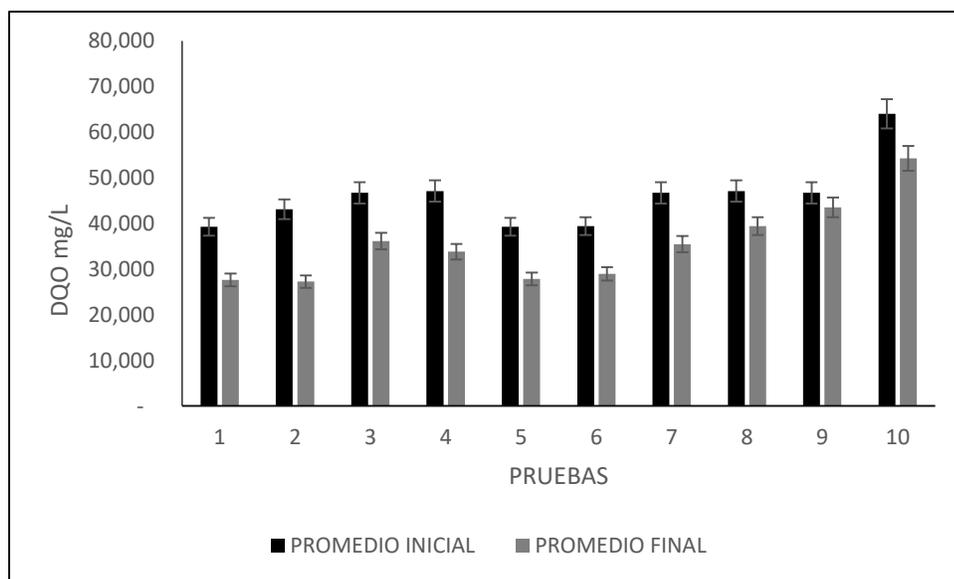


Figura 14. Comportamiento inicial y final de la DQO.

La DQO inicial del sustrato se controló en un inicio con la aplicación de los pretratamientos; las muestras se prepararon a concentraciones de 15,000 mg DQO/L y 30, 000 mg DQO/L. En cada prueba el consumo de sustrato fue diferente, según se puede apreciar en la Tabla 14.

Tabla 14. Comportamiento del consumo de sustrato pretratado.

Prueba	mg DQO / L			DQO consumido, %p
	Inicial	Consumido	Final	
1	14,500	6,775	7,725	47
2	14,800	7,275	7,525	49
3	29,400	5,675	23,725	19
4	30,200	8,425	21,775	28
5	14,500	6,525	7,975	45
6	14,800	5,575	9,225	38
7	29,400	6,375	23,025	9
8	30,200	2,825	27,375	8

En el testigo constituido por sustrato solo troceado se consumieron 3,600 mg DQO/L, quedando 26, 600 mg /L de DQO sin consumir, de la carga inicial que fueron 30,200 mg DQO/L; esto es solo se consumió el 12%p. En el testigo constituido solo por inóculo se consumieron 4 ,875 mg DQO/L, quedando con 59,125 mg /L de DQO sin consumir, de la carga inicial que fueron 64,000 mg DQO/L; por lo tanto, solo se consumió el 8%p (Figura 15), de estos resultados obtenidos respecto DQOs inicial (Figura 8), fue la que probablemente se consumió por los microorganismos, debido a esto la producción de biogás se detuvo, debido a que la materia sobrante es más difícil de degradar.

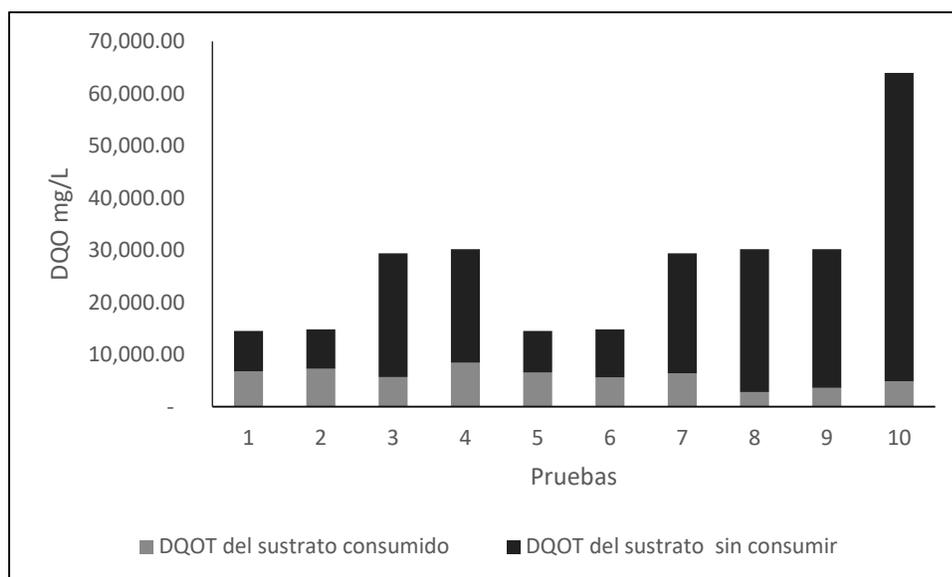


Figura 15. Comportamiento inicial y final de la DQO en el sustrato.

4.4.6. Comportamiento inicial y final de los sólidos totales (ST)

La determinación de ST permitió estimar el contenido de materia disuelta y suspendida presente, tanto en el sustrato como en el inóculo. Al realizar las mezclas estos bajaron debido a la dilución, así como también variaron debido a que cada prueba contenía una concentración inicial diferente (Tabla 15; Figura 16). En el punto de mayor rendimiento a biogás, la prueba 4, cuyo consumo total de la materia, disuelta y suspendida, fue de 18.29 %p.

Tabla 15. Comportamiento de sólidos totales.

Prueba	Sólidos totales, mg/L	
	Iniciales	Finales
1	31,863	27,760
2	31,863	29,050
3	41,903	37,210
4	41,903	35,550
5	31,863	29,390
6	31,863	29,390
7	41,903	34,435
8	41,903	39,245
9	41,903	39,460
10	50,787	43,590

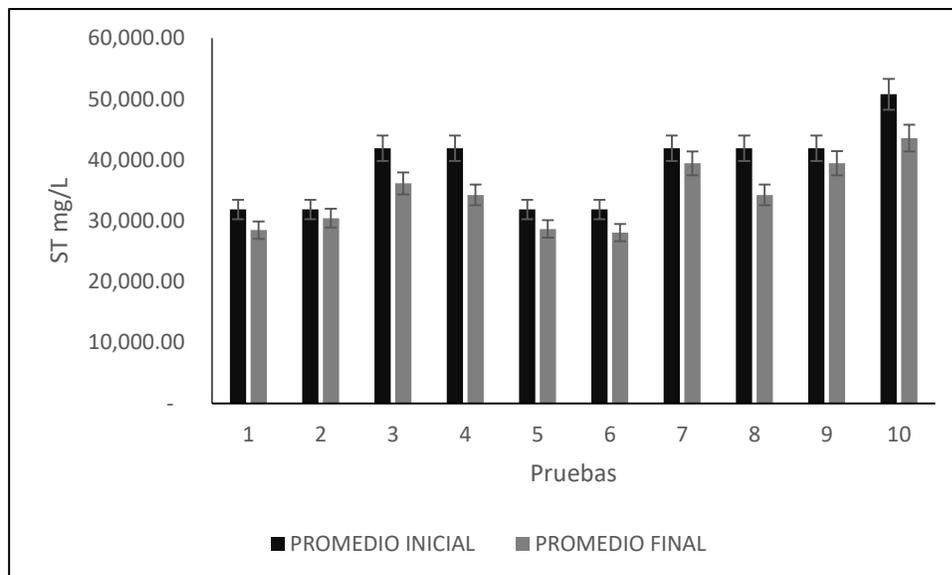


Figura 16. Comportamiento inicial y final de los sólidos totales.

Sin embargo, el evaluar el consumo de los ST respecto al sustrato, la materia disuelta y suspendida consumida fue del 7 al 30%, en la prueba 1 se consumió el 26.34%, en la prueba 2 se consumió el 11%, en la prueba 3 se consumió un 17.44 %, en la prueba 4 se consumió el 23%, en

la prueba 5 se consumió el 24.79 %, en la prueba 6 se consumió el 29.43%, en la prueba 7 se consumió el 7.48 %, en la prueba 8 se consumió el 23.19%, en la prueba 9 se consumió el 7.40 %, en la prueba 10 se consumió el 14.17 % (Figura 17) esto demuestra que la materia suspendida y disuelta no se consumió totalmente.

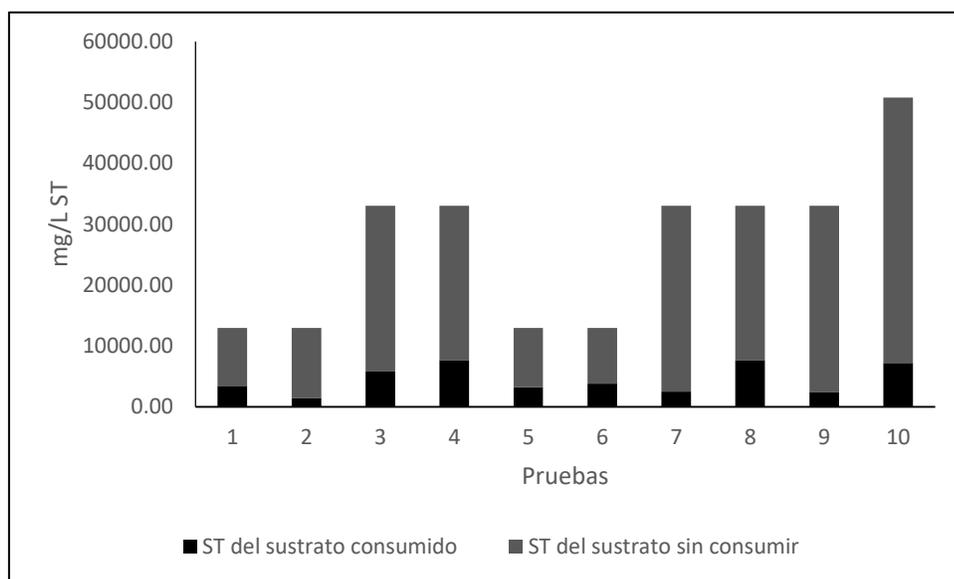


Figura 17. Comportamiento de los ST en el sustrato después de la prueba *BMP*.

4.4.7. Comportamiento inicial y final de los Sólidos Totales Volátiles (STV)

La evaluación de STV es una forma de cuantificar la materia orgánica presente, tanto en el sustrato como en el inóculo, las mezclas en este caso (Figura 18).

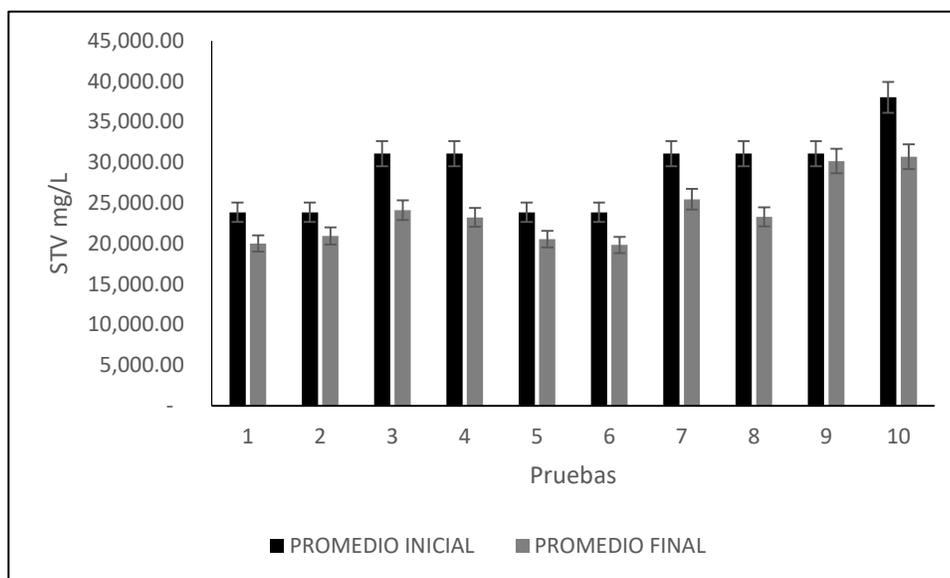


Figura 18. Comportamiento inicial y final de los sólidos totales volátiles.

En el caso del sustrato, los STV inicialmente variaron debido a las diluciones realizadas en los pretratamientos, los cuales cuantifican de manera indirecta son materia orgánica. En la Tabla 16 se resumen los resultados obtenidos.

Prueba	STV, mg/L		Consumo, %p
	Iniciales	Finales	
1	9,693	6,017	39.61
2	9,693	6,972	30.02
3	24,140	17,188	28.80
4	24,140	16,282	32.55
9	24,140	23,223	3.80
10	24,140	16,352	32.26

En las pruebas 1 y 2 el porcentaje de consumo de STV fue bajo, debido a probablemente que la materia orgánica no estaba completamente disuelta. Las pruebas y 4 se aprecia que el consumo fue muy similar a las pruebas 1 y 2, en el mismo tiempo. Las pruebas 5,6,7 y 8 exhibieron el mismo comportamiento que la prueba 4. Sin embargo, en la prueba 9, testigo con el sustrato troceado, solo se consumió el 3.80%p. En contraste, en la prueba 10 se consumió el 32.26%p de STV iniciales, lo que lleva a concluir que la cantidad consumida fue solo materia soluble, la cual es más fácil de asimilar para los microorganismos (Figura 19).

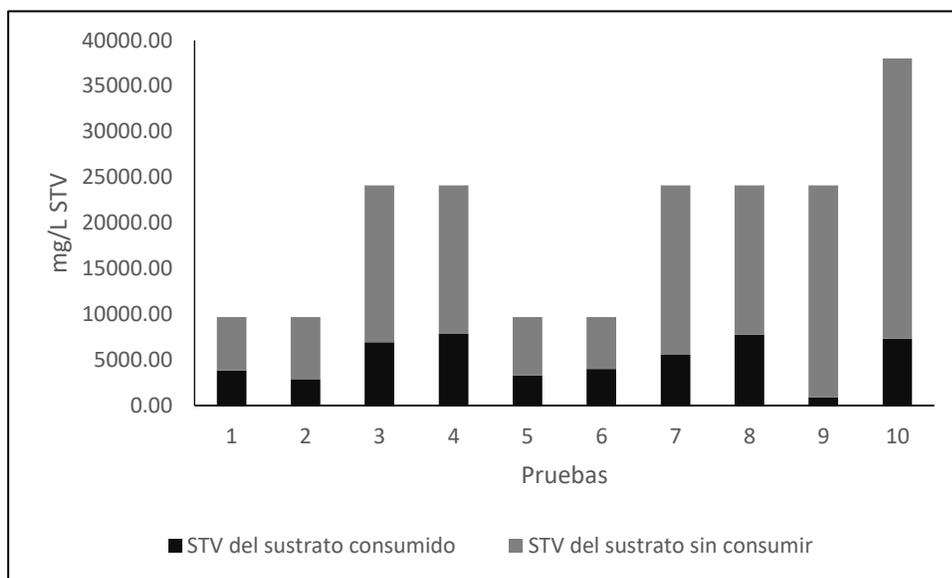


Figura 19. Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el sustrato.

4.4.9. Comportamiento inicial y final de los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) en el inóculo

Los SSV, cuantifican indirectamente la cantidad de microorganismos presentes, en el inóculo, en el caso del inóculo inicialmente se obtuvo una concentración de 33,400 mg/L, la cual se encontró arriba de lo que se recomienda Li *et al.*, (2020); Lettinga (1980), la cual debe estar en los intervalos de 10,000 -15,000 mg/L. finalizando la prueba la cual duro 30 días la variación, en el caso del inóculo el porcentaje de reducción de microorganismos fue del 1.05%, en este caso lo que probablemente paso fue que las bacterias al no tener materia orgánica para consumir, debido a que el inóculo provenía de un reactor anaerobio de aguas residuales restauranteras, provoco una fase endógena ya que agotaron sus nutrientes sobrantes del agua residual.

En el caso de las pruebas, al cambiar el sustrato de aguas residuales cuya carga orgánica era de 6,000 mg DQO/L -8,000 mg DQO/L, a los residuos de la cactácea *Opuntia ficus indica* y su previo pretratamiento combinado, esto afecto a los consorcios microbianos debido que estos comenzaron a adaptarse al nuevo sustrato, sin embargo aunque la SSV, disminuyeron se encontraron dentro de los intervalos que anteriormente se mencionan, en el testigo que fue troceado (prueba 9), en el cual los SSV disminuyeron hasta un 68.34%, esto se debió a que el pH no se ajustó (4.5) y las bacterias que no son facultativas comenzaron a inhibirse y algunas, inclusive, a morir (Tabla 17; Figura 20).

Tabla 17. Estimación del cambio de población microbiana en función de los SVV.

Prueba	Cambio de SVV al final, mg/L	%p reducción de la población
1	-9,866	29.54
2	-9,341	27.97
3	-15,000	44.91
4	-16,650	49.91
5	-10,066	30.14
6	-9,616	28.79
7	-16,150	48.35
8	-18,750	56.14
9	-22,825	68.34
10	350	1.05

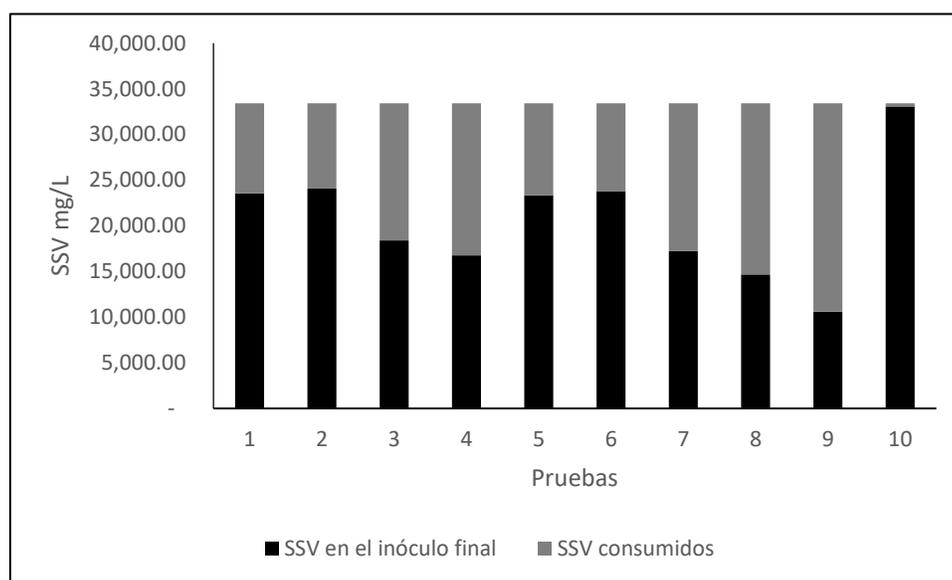


Figura 20. Comportamiento inicial y final de los sólidos suspendidos volátiles del inóculo.

4.5. Producción de biogás

4.5.1. Perfil de producción de biogás por prueba

La producción de biogás (Tabla 18, Figura 21-25) comenzó en las primeras 24 h, con diferencia en el volumen obtenido de cada prueba; esto se debió a que la combinación de pretratamientos (Tabla 13) contribuyera a que la materia orgánica se volviera biodisponible para los consorcios microbianos en la etapa hidrolítica (Kumar *et al.*, 2018; Kumari *et al.*, 2019). Posteriormente la producción se detuvo entre los días 9 y 17 dependiendo de cada prueba (Tabla 18); el periodo completo de la prueba *BMP* fue 30 días. Las pruebas con mayor concentración inicial de DQO obtuvieron mayor producción de biogás, debido a que existía mayor cantidad de materia disponible para que fuera consumida por los consorcios microbianos; estas pruebas fueron 3,4,7 y 8. Finalmente, la prueba 9 fue un testigo en que el sustrato fue troceado y lo único que se controló fue la concentración inicial de DQO, notándose que ésta también generó biogás (Tabla 18).

Prueba	Inicial, mL	Final, mL	Último día de producción
1	140	355	9
2	165	522	15
3	355	755	17
4	905	1,353	10
5	130	305	9
6	130	330	10
7	227	630	17
8	247	563	16
9	255	853	15
10	15	165	17

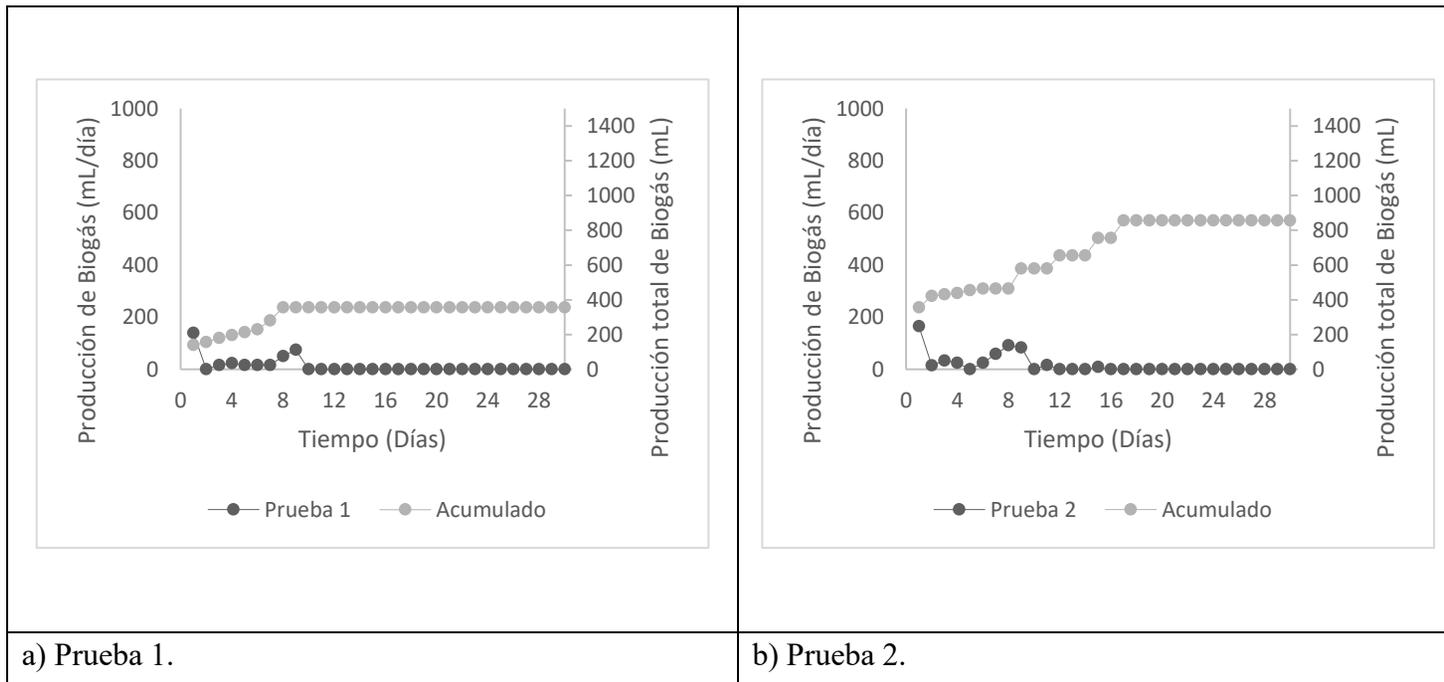


Figura 21. Producción de Biogás en la prueba *BMP* por día y total acumulado de producción.

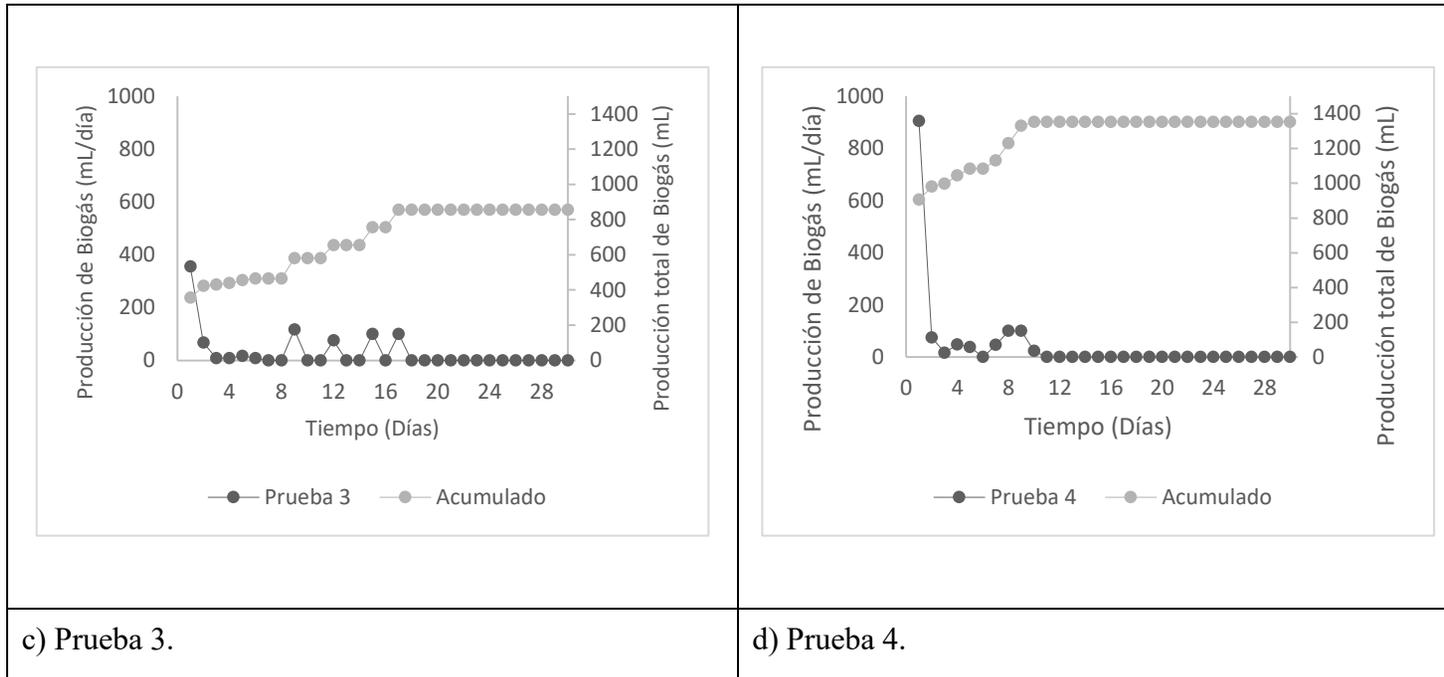


Figura 22. Producción de Biogás en la prueba *BMP* por día y total acumulado de producción (continuación).

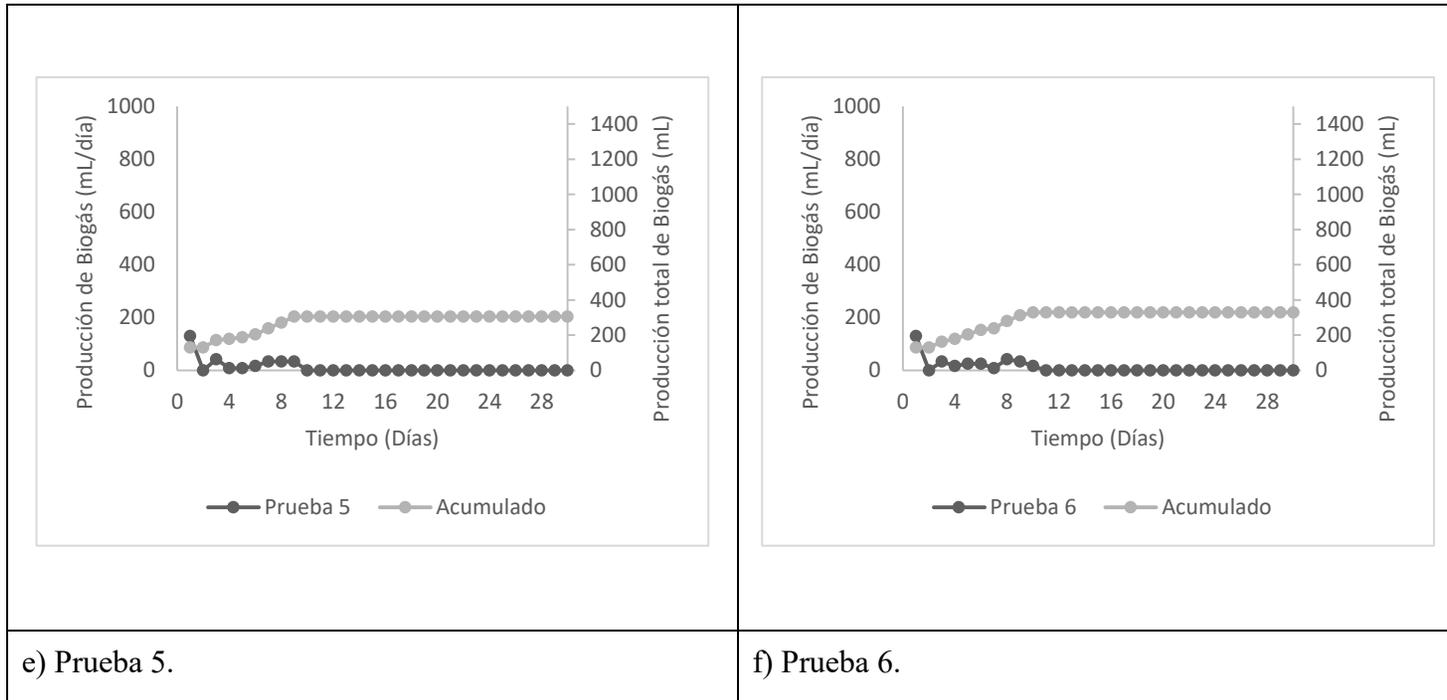


Figura 23. Producción de Biogás en la prueba *BMP* por día y total acumulado de producción (continuación).

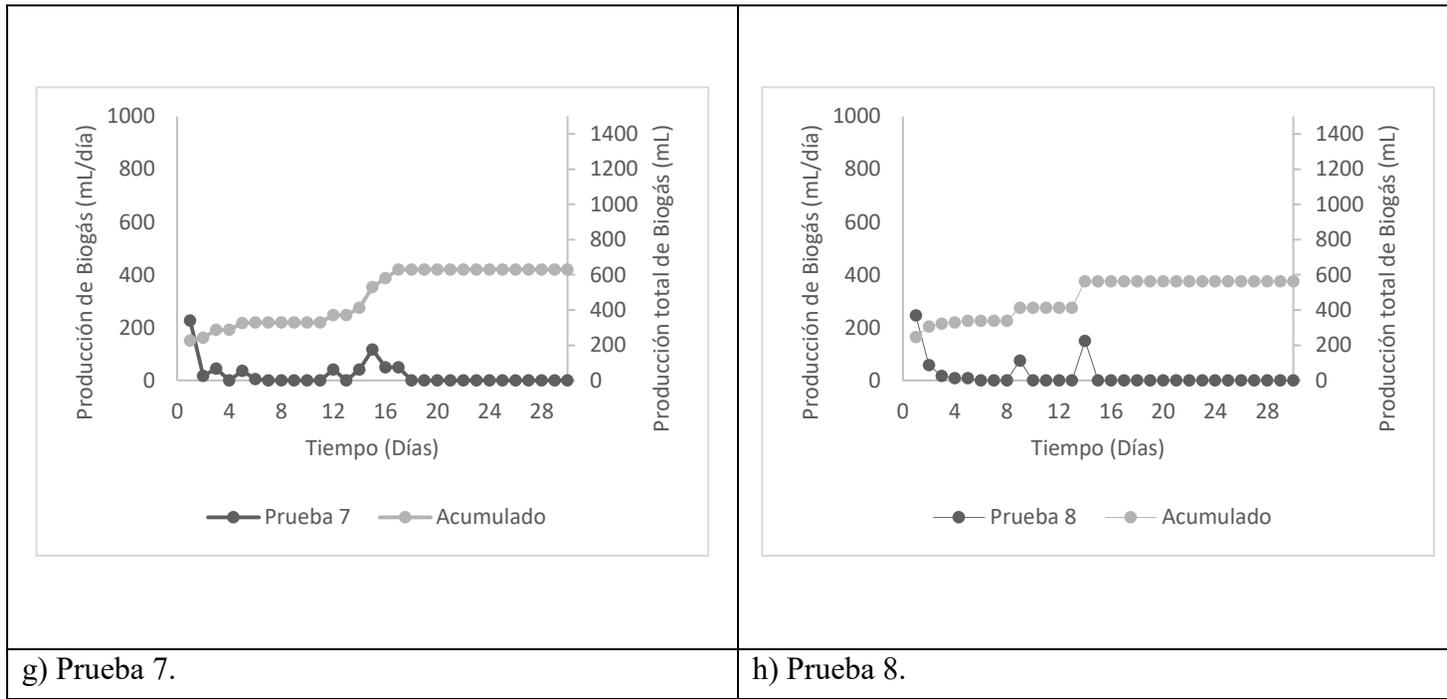


Figura 24. Producción de Biogás en la prueba *BMP* por día y total acumulado de producción (continuación).

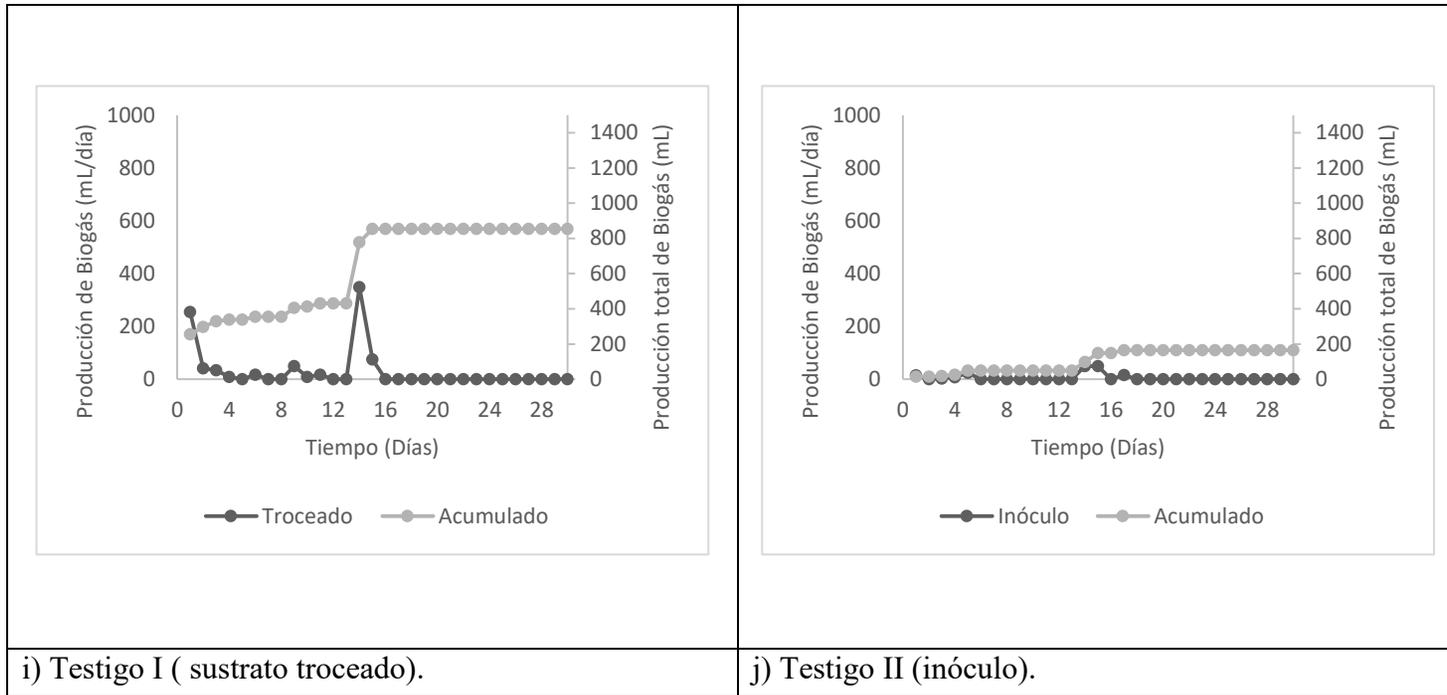


Figura 25. Producción de Biogás en la prueba *BMP* por día y total acumulado de producción (continuación).

La relación que existió en las pruebas *BMP* entre el pH, alcalinidad y AGV's, fue que la alcalinidad al estar arriba de lo recomendado y que los AGV's ligeramente rebasaron los límites reportados. El pH se mantuvo neutro debido a una probable estabilidad en el reactor, adaptación de los consorcios microbianos debido a la producción de biogás. Sin embargo, al parar la producción de biogás en las pruebas (promedio 14 en todas las pruebas), esto se atribuye a que la DQO, fue consumida, ya que en el testigo del troceado (prueba 9) la producción de biogás terminó día 15. Algo notable fue que en la prueba 10, la cual es el testigo del inóculo, existió producción de biogás hasta el día 17; esto puede deberse a que el inóculo se estaba adaptando al sustrato que se suministraba, las aguas residuales restauranteras.

4.5.2. Calidad del biogás

La calidad de biogás varió respecto a cada prueba (Tabla 24, Figura 21). La mayor cantidad de metano se obtuvo en la prueba 4, seguida por la prueba 3, después la 2, y finalmente de las pruebas 7, 8 y 9; por lo tanto, se puede notar que la molienda gruesa y la concentración, tuvieron gran impacto en la calidad de biogás respecto de la prueba 9 que sólo fue nopal troceado.

Tabla 24. Calidad del biogás producido en las pruebas de digestión anaerobia.

Prueba	Volumen producido, mL	CH ₄ , %v	Volumen CH ₄ , mL	CO ₂ , %v
1	355	55	105.13	45
2	522	64	228	36
3	855	47	323	53
4	1,353	56	663	44
5	305	54	75	46
6	330	57	94	43
7	630	53	245	47
8	563	55	220.63	45
9	853	34	234	66
10	165	66	109	28

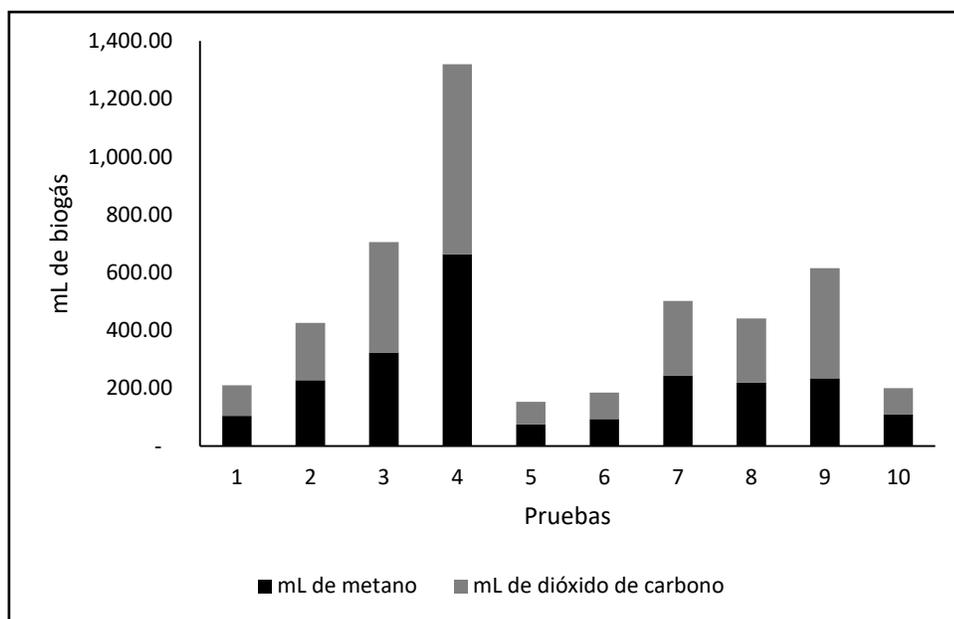


Figura 26. Calidad de biogás.

4.5.3. Rendimientos a biogás y a metano

El rendimiento a biogás varió respecto a cada prueba (Tabla 17). La mayor cantidad de metano se obtuvo en la prueba 4, seguida por la prueba 8, después las pruebas 1 y 2, de las pruebas 6 y 7, y finalmente la prueba 5 que fue la de menores rendimientos; por lo tanto, se puede notar que la molienda también tuvo gran impacto en el rendimiento a biogás.

Tabla 25. Rendimiento a biogás y metano en las pruebas *BMP*.

Prueba	Rendimiento a biogás, mL/g nopal	Rendimiento a metano, mL/g nopal	Rendimiento de metano, por gramos de sustrato consumido mL/g nopal consumido
1	133.24	73.73	196.43
2	124.67	79.80	228.32
3	154.57	72.56	323.92
4	179.31	100.08	663.22
5	54.56	29.40	75.45
6	75.26	42.85	93.95
7	92.73	48.83	244.87
8	179.25	99.30	220.65

4.6. Análisis estadístico del diseño de experimentos

Con la obtención de los resultados experimentales se realizó el análisis del diseño de experimentos Taguchi L₈, a partir de los efectos de los pretratamientos en el sustrato sobre las respuestas producción de biogás y producción de metano en las pruebas *BMP*.

4.6.1. Análisis de la “señal ruido” en la producción de biogás

Se usó la señal ruido debido a que los factores que se implementaron son factores incontrolables; sin embargo, estos fueron controlados para la prueba *BMP* a fin de identificar la configuración de factores de control que minimice la variabilidad causada por los factores de ruido. La señal ruido (*S/N*) usada fue “*mayor es mejor*” (Ecuación 4.7):

$$\left[\left(\frac{S}{N} \right) = -10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{\bar{s}^2} \right) \right] \quad (4.7)$$

Aquí, *S/N* representa el índice de señal ruido; el logaritmo se aplica a la relación del cuadrado del promedio global con respecto al estimador de la varianza de la muestra.

4.6.1.1. Respuesta para las relaciones de señal ruido “*mayor es mejor*”

La variable delta (Tabla 26) indica la diferencia entre los valores de respuesta más altos y más bajos para cada factor; en este caso se obtuvo que el pretratamiento de concentración fue el que tuvo mayor efecto en la relación *S/N*, posteriormente fue el mecánico, después el térmico y finalmente el químico.

Nivel	Mecánico (molienda)	Concentración (mg DQO/L)	Químico (pH)	Térmico (° C)
1	56.49	51.29	53.77	54.88
2	51.97	57.17	54.69	53.58
Delta	4.51	5.87	0.93	1.29
Clasificar	2	1	4	3

4.6.1.2. Efectos de principales para las relaciones *S/N*

En los resultados de efectos principales para la relación *S/N* en la producción de biogás (Figura 22), se confirma que el pretratamiento de concentración ejerce el mayor efecto sobre la relación

de señal de ruido en el nivel alto (30,000 mg DQO/L). En promedio, las corridas experimentales con el nivel alto de concentración registraron relaciones de señal a ruido más altas que las corridas experimentales con el nivel bajo de concentración, posteriormente el pretratamiento mecánico en el nivel bajo exhibió señales mayores de ruido que el nivel bajo (molienda gruesa), y finalmente se aprecia que los pretratamientos químico y térmico no tuvieron un efecto alto de la señal de ruido.

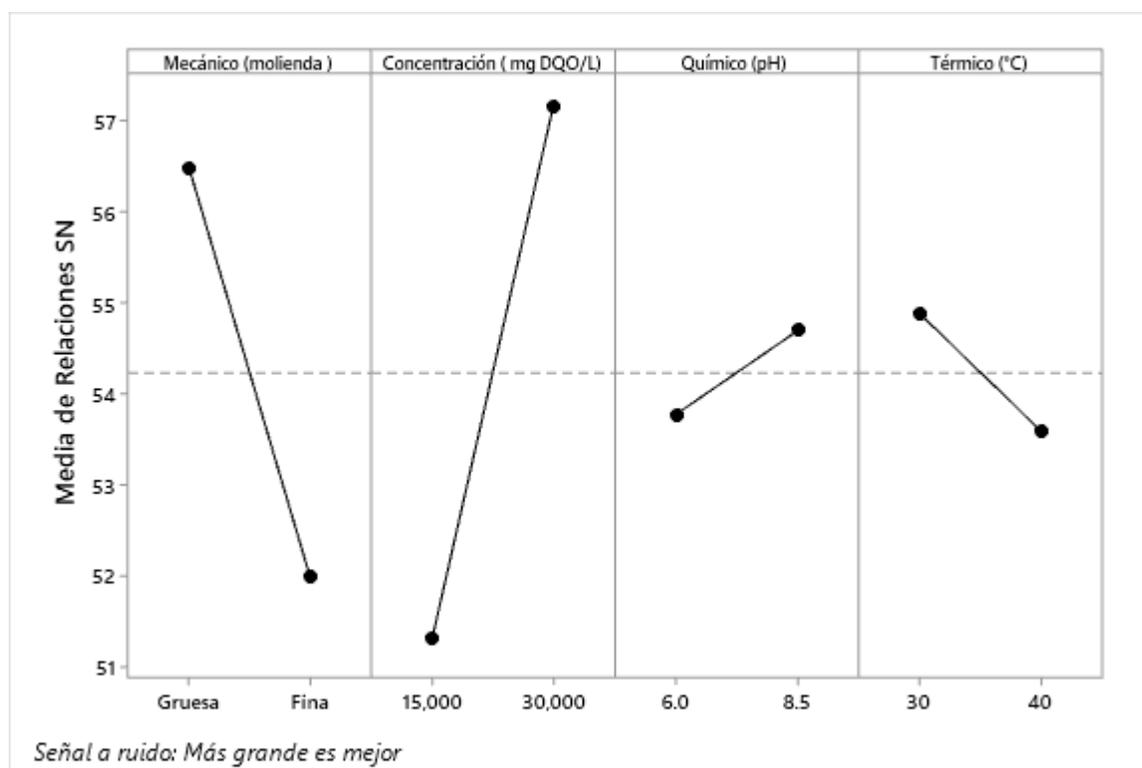


Figura 27. Efectos principales para relaciones (S/N) medias de datos.

4.6.2. Análisis de medias de medias en la producción de biogás

En este caso para el análisis de medias (Tabla 27), nuevamente el pretratamiento con mayor impacto fue el de concentración seguido del mecánico; sin embargo, se puede apreciar que, en comparación con la señal de ruido, el químico fue el de menor impacto. Este resultado contrasta con su influencia en el caso de la producción de biogás, se puede observar la variación de la delta en el caso de la concentración fue de 850.4 en el caso del nivel alto, y en el nivel bajo fue de 377.9. En general se nota que la variación respecto a los pretratamientos fue significativa en el impacto de la generación de biogás.

Tabla 27. Respuesta para análisis de medias de medias.

Nivel	Mecánico (molienda)	Concentración (mg DQO/L)	Químico (pH)	Térmico (° C)
1	771.2	377.9	536.3	667.1
2	457.1	850.4	692.1	561.2
Delta	314.2	472.5	155.8	105.8
Clasificar	2	1	3	4

El análisis de efectos principales para medias de medias (Figura 23) para la producción de biogás, indica que el pretratamiento de concentración ejerce el mayor efecto en su nivel alto. Posteriormente, el pretratamiento mecánico en su nivel bajo es el segundo efecto principal; en tanto que los efectos químico y térmico no variaron mucho y que además no fueron significativos.

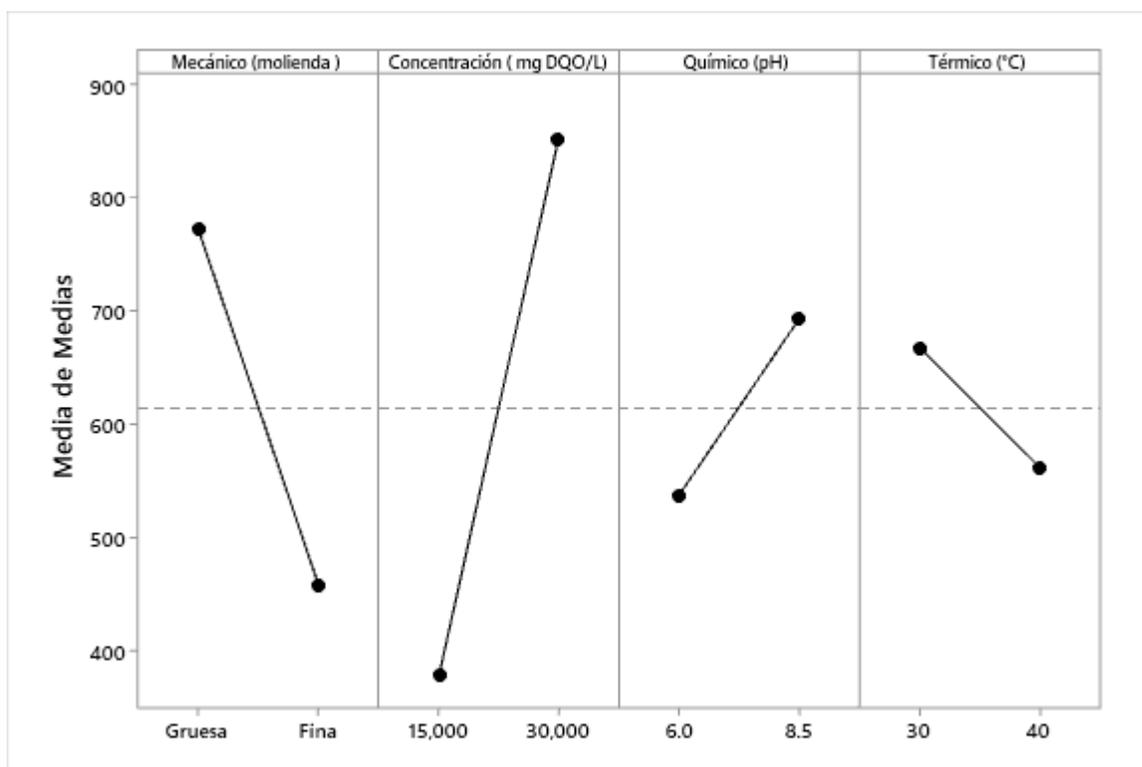


Figura 28. Efectos principales para medias de medias.

4.6.1.4. Análisis de interacciones para medias y medias de datos en los pretratamientos del sustrato en la producción de biogás

4.6.1.4.1. Interacción para medias en el pretratamiento mecánico

La interacción observada de los pretratamientos se puede apreciar, ya que las líneas no son paralelas. La interacción del pretratamiento mecánico con molienda gruesa y el de concentración de 30,000 mg DQO/L, se nota significativa. En el caso del pretratamiento mecánico de molienda fina con el pretratamiento químico a pH de 8.5 se observa también interacción significativa. Finalmente, la interacción del pretratamiento mecánico de molienda gruesa con el térmico a 30° C, también se nota significativa.

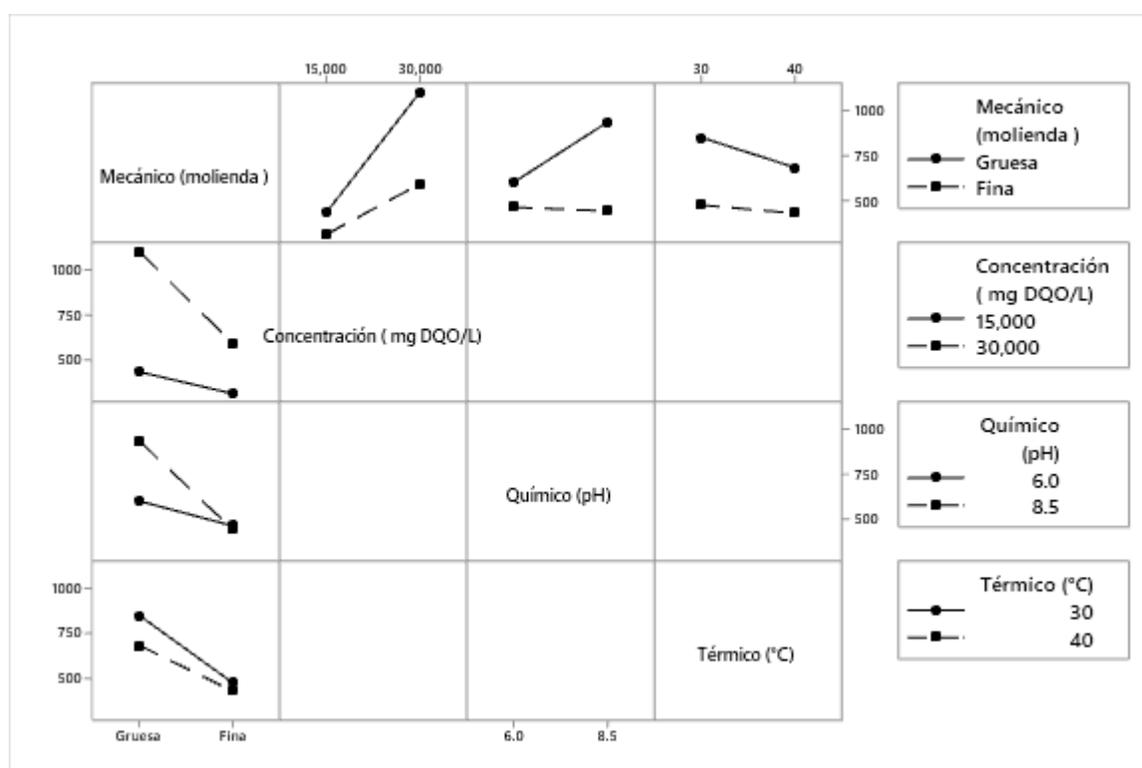


Figura 29. Interacción para medias en el pretratamiento mecánico.

4.6.1.4.2. Interacción para medias en el pretratamiento de concentración

En este caso la interacción que tuvo el pretratamiento de concentración con el químico resultó que fue, concentración de 30,000 mg/L y pH 8.5 y con el térmico fue a 40° C.

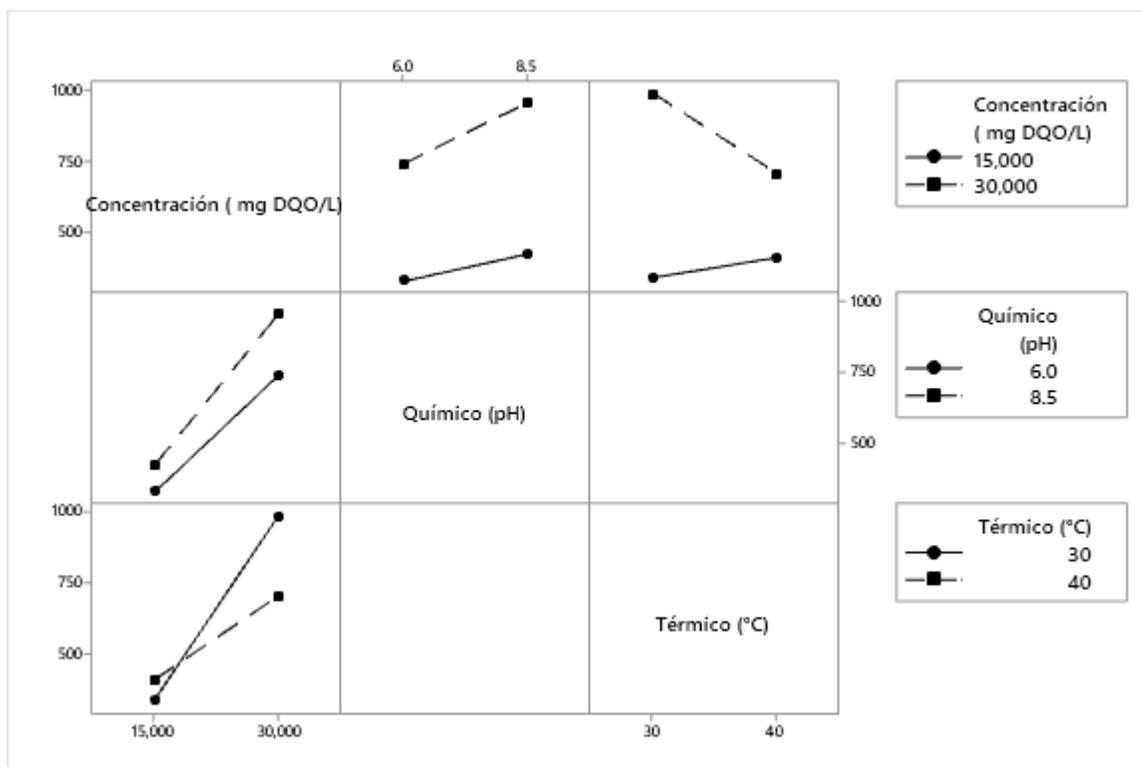


Figura 30. Interacción para medias en el pretratamiento concentración.

4.6.1.4.3. Interacción para medias en el pretratamiento químico y térmico

En el caso de la interacción del químico con el térmico existió una mayor interacción debido a que las líneas se encuentran cruzadas, sin embargo, en el caso de el pH el que interactuó mejor fue el 6 a 30° C.

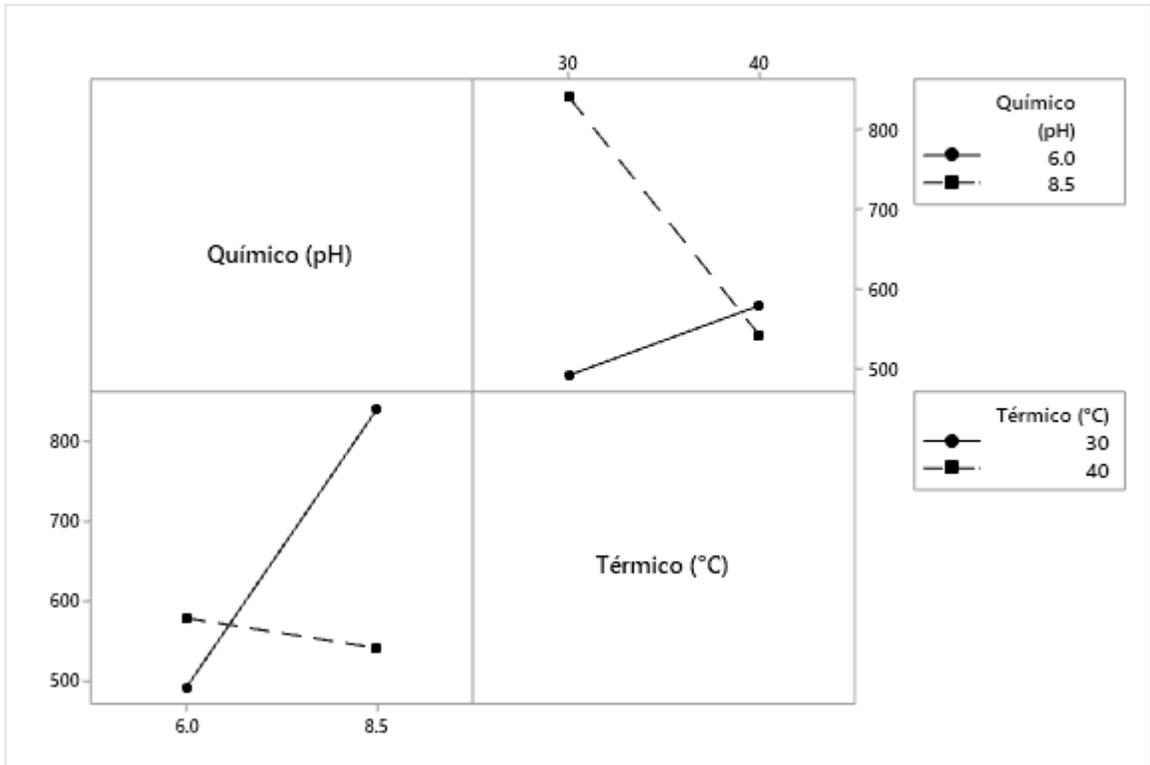


Figura 31. Interacción para medias en el pretratamiento químico y térmico.

CONCLUSIONES

Conclusiones

En esta investigación se estudio el efecto de los pretratamientos a partir de la digestión anaerobia de la cactácea *Opuntia ficus indica*, para la producción de biogás, metano así como el rendimiento respectivamente.

- Los pretratamientos combinados tuvieron un impacto positivo en la producción y calidad del biogás, manteniendo el porcentaje de metano dentro del 50-60 % y con el testigo de troceado de nopal sólo se generó un 30 % de metano, por lo que estos permitieron una mayor disponibilidad del sustrato.
- La producción de biogás fue de 1353 mL acumulado, con un 56 % de CH₄, siendo las mejores condiciones de los pretratamientos combinados: molienda gruesa, concentración de 30,000 mg/L, temperatura de 40° C y pH de 8.5, confirmando la disponibilidad del sustrato a estas condiciones en la producción de biogás.
- La prueba *BMP* fue un referente importante para establecer la disponibilidad del sustrato que permitió obtener un rendimiento de metano de 663.22 mL/g del sustrato consumido respecto a los testigos.
- Del análisis de los resultados del diseño experimental Taguchi L₈ la mejor combinación a usar es la molienda gruesa, concentración de 30,000 mg/L, temperatura de 30° C y pH de 8.5, lo cual permitió establecer el impacto sobre la producción de biogás y la calidad de metano bajo estas condiciones.
- De la caracterización fisicoquímica y los parámetros de viabilidad del inóculo (sin adaptación al sustrato), los cuales se encontraron dentro de los intervalos favorables comparados con literatura, por lo cual se generaron las condiciones favorables para llevar acabo la digestión anaerobia.
- De los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la caracterización del sustrato (tales como pH, alcalinidad y DQO), se encontró que no fue viable para llevar a cabo la digestión anaerobia directa; atribuido probablemente a que estos parámetros se encontraron fuera de los intervalos recomendados en el literatura; los parámetros iniciales fueron la base para el inicio del proceso de los pretramientos combinados, con una relación C/N/P de 466.80/7.9/1.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones

De la experiencia obtenida durante el desarrollo de la investigación sobre la evaluación de la combinación de los pretatamientos para la generación de biogás a partir de la digestión anaerobia de la cactácea *Opuntia ficus indica*, se sugieren las recomendaciones para trabajos a futuro que se mencionan a continuación:

- Estandarización de la prueba *BMP*.
- Modificación de los pretatamientos combinados empleando diferentes diseños de experimentos.
- Implementación experimental en un reactor anaerobio a escala piloto, partiendo de las mejores condiciones encontradas en la presente investigación.
- Planteamiento de un modelo del control del reactor anaerobio a escala piloto.
- Combinación del análisis de ciclo de vida con los resultados del proceso experimental.
- Identificación de los consorcios existentes en el inóculo al inicio al arranque del reactor, así como en el transcurso de adaptación de éste y en la producción de biogás, para definir las etapas anaerobias de manera más precisa y conocer bajo que condiciones se favorece la producción de metano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Alcántar González. (2014).** *Potencial de generación de biogás de la codigestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos con aceite comestible usado.* CDMX, México, México.
2. **Álvarez C. (2009).** *Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional,* UNAM, 359:63-89, <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>
3. **Aydin S. (2017)** *Anaerobic Digestion.* In: Singh L., Kalia V. (eds) *Waste Biomass Management – A Holistic Approach.* Springer, Cham: 1-14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49595-8_1
4. **Bajpai, P. (2017).** *Process Parameters Affecting Anaerobic Digestion anaerobia.* *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*, 13–27. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4130-3_3
5. **Caicedo Messa, F. J. (2006).** *Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto.* Manizales, Manizales, Colombia.
6. **Calabrò, P. (2017).** *Effect of three pretreatment techniques on the chemical composition and on the methane yields of Opuntia ficus-indica (prickly pear) biomass.* *Waste Management & Research*, 1-13.
7. **Chen H, Wei Y, Liang P, Wang C, Hu, Xie M, Wang, Xiao B, Du C, Tian H (2020).** *Performance and microbial community variations of a Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor for treating monosodium glutamate wastewater: Effects of organic loading rate.* *Journal of Environmental Management.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109691>.
8. **Cruz I. R. (2015).** *Producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café.* Xalapa, Xalapa, México.
9. **Dekker, R. F. (1985).** *Pretreatment options for the enzymatic saccharification of lignocellulose.* *Symposium on the pretreatment of lignocellulosics materials.* New Zealand.
10. **Díaz Báez, M. C., Espitia Vargas, S. E., & Molina Pérez, F. (2002).** *Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología.* Bogotá: instituto de biotecnología.
11. **Faba, L., Díaz, E., & Ordoñez, S. (2014).** *Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación.* *Madera y Bosques*, 11-24.
12. **Fernández, J. (2012).** *Energía de la Biomasa.* Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. <https://www.energiasrenovables.com/ficheroenergias/productos/pdf/Revista569.pdf>
13. **Fernández, J. L. (2012).** *El cambio climático: sus causas y efectos ambientales.* *An Real Acad Med Cir Vall*, 71-98.
14. **Fernández, R. J. (2010).** *Optimización de la digestión anaerobia seca de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Cádiz, Cádiz, España.

15. **Ferreira, G. (Ed.). (2013)** *Alternative Energies Updates on Progress*. doi: 10.1007 / 978-3-642-40680-5, Springer.
16. **García Castillo, C. C. (2012).** *Evaluación de la capacidad de remoción de materia orgánica de*
17. **Godoy, F. S. (2012).** *Potencial del cultivo de la Chumbrera (Opuntia ficus- indica (L) Miller) para la obtención de biocombustibles*. Madrid, España, España.
18. **Góngora Cauich, José Vicente. (2016),** *Establecimiento de un proceso de hidrólisis a partir de cladodios frescos y secos de nopal (opuntia spp.) Para la obtención de azúcares fermentables*. Mérida, Yucatán
19. **Hassan, SR, Zaman, NQ y Dahlan, I. (2015),** *Effect of Organic Loading Rate on Anaerobic Digestion: Case Study on Recycled Paper Mill Effluent using Modified Anaerobic Hybrid Baffled (MAHB) Reactor*. *Environmental Engineering, KSCE Journal of Civil Engineering*, 19:1- 6, <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0746-9>
20. **Yildiz I. (2018).** *Fossil Fuels, Comprehensive Energy Systems*. Elsevier, 1:521-567, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00111-5>
21. **Jacuinde J (2018).** *Determinación del tamaño de partícula de gránulo en función del tiempo del envejecimiento del lodo anaerobio en un reactor anaerobio*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
22. **Kainthola J, Kalamdhad A, Goud V. (2019)** *A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques*. *Process Biochemistry*, 94:81-90.
23. **Kaltschmitt M, Streicher W, & Wiese A. (2007).** *Renewable Energy, Technology, Economics and Environment*. Germany: Springer. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-70949-5>.
24. **Krishnaiah, K., Shahabudeen, P. (2012).** *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*. Nueva Delhi: PHI Learning Private Limited.
25. **Kumar G, Dharmarajab J, Arvindnarayanc S, Shoband S, Bakonyie P, Saratalef G, Nemestóthye N, Bakóe K, Jun Yoong J, Kimh S. (2019).** *A comprehensive review on thermochemical, biological, biochemical and hybrid conversion methods of bio-derived lignocellulosic molecules into renewable fuels*. *Fuel*, 251:352-367. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.049>.
26. **Kumari D, Singh R. (2018).** *Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90:877-891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>.
27. **Li Y, Chena Y, Wuc, (2019).** *Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review*, *Applied Energy*, 240:120-137: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>
28. **Li H, Han K, Li Z, Zhang J, Li H, Huang M, Shen L, Li Q, Wang Y. (2018).** *Performance, granule conductivity and microbial community analysis of Upflow anaerobic sludge blanket*

- (UASB) reactors from mesophilic to thermophilic operation. *Biochemical Engineering Journal*, 133: 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.01.029>
29. **Machado CM. (2010).** Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. OLADE, IICA.
 30. **Maciel CÁ. (2009).** *Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico mercados actuales y comercio internacional.* México.
 31. **Madrid,CD. (2002).** *Biomasa el recorrido de la energía .* Madrid : E.i.S.E. Domènech, S.A.
 32. **Masera O, Coralli F, García C, Riegelhaupt E, Arias T, Vega J, Jiménez R, Guerrero G, Cecotti L, (2011).** *La bioenergía en México, Situación actual y perspectivas,* Red Mexicana de Bioenergía, A.C. <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT4.pdf>.
 33. **Mendoza Salgado. (2004).** *Estudio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario La Esmeralda y su respuesta bajo tratamiento en filtro anaerobio piloto de flujo ascendente.* Colombia, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Colombia. Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/1059/1/patriciamedozasalgado.2004_.pdf
 34. **Metcalf y Eddy . (2003).** *Waste Water Enginnering.* EUA.: Mc Graw Hill.
 35. **Naik SN, Vaibhav VG, Rout PK, Dalay AB, (2010).** *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.14, Issue 2:578-597.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
 36. **Negro MJ. (2003).** *Changes in various physical/ parameters of Pinus radiate wood after steam explosion pretreatment.* Biomass. Bioenergy.
 37. **Palomares Rodríguez C. (2013).** *Evaluación de la producción de biogás bajo condiciones controladas de temperatura en un reactor UASB con alimentación intermitente de agua residual de rastro.* Morelia, Michocán, México.
 38. **Pascual A, Ruiz B, & Gómez P. (2011).** Situación y potencial de generación de biogás. Estudio técnico, IDAE, Madrid.
 39. **Puñal ATM. (2000).** *Influence of c:n ratio on the start-up of upflow. Elsevier Science Ltd. All rights reserved, 2614-2619.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/223028569_Influence_of_CN_ratio_on_the_start-up_of_up-flow_anaerobic_filter_reactors
 40. **Quintero Silva MJ. (2010).** *Estudio de consorcios microbianos para la producción de biogás a partir de residuos del fique.* Bucaramanga, Colombia.
 41. **Rosenkranz Fernández, F (2013).** *Estudio del comportamiento de reactores anaerobios de tipo ASBR frente a compuestos de difícil degradación y/o efectores negativos,* España-Chile.
 42. **Ruane J, Sonnino A, & Agostini A. (2010).** Bionergy and potential contribution of agricultural biotechnologies in developing countries. *Science Direct*, 1427-1439.

43. **Sáenz C. (2006).** *Utilización agroindustrial del nopal*. Roma: FAO.
44. **Sánchez Reyes C, Patiño Iglesias M, Alcántara Flores J, Reyes Ortega Y, Pérez Cruz M, & Ortiz Muñoz E. (2016).** " *Determinación del potencial bioquímico de metano (pbm) de residuos de frutas y verduras en hogares*". *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 191-194.
45. **Tchobanogluos G, Burton F, Metcalf F & Eddy, I. (1995).** *Ingeniería de aguas residuales*. Interamericana de España: Mac-Graw Hill.
46. **Torres Lozada P, Rodríguez JA., Barba LE., Morán A, Narváez. (2005).** Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 50-60.
47. **Uddin MN, Rahman MA, Taweekun J, Techato K, Mofijur M, Rasul M, (2019),** *Enhancement of biogas generation in up- flow sludge blanket (UASB) bioreactor from oil mill effluent (POME)*, *Energy Procedia*, 160:670-676.
48. **Verdezoto Acurio JW, Vique Salazar GI. (2011).** Evaluación de un reactor UASB y producción de biogás de los residuales líquidos del beneficiado húmedo de café. Latacunga, Ecuador.
49. **Xu R, Zhang K, Liu P, Khan A, Xiong J, Tian, F, Li X. (2018).** *A critical review on the interaction of substrate nutrient balance and microbial community structure and function in anaerobic co-digestion*. *Bioresource Technology*, 247:1119–1127. doi:10.1016/j.biortech.2017.09.095
50. **Yildiz I. (2018).** *Fossil Fuels*. Elsevier Inc. All rights reserved, 521-567.
51. **Yua Q, Liua R, Lia K, Maa. (2019).** *A review of crop straw pretreatment methods for biogas production by anaerobic digestion in China*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107: 51-58
52. **Alanís Silva, ED. (2017).** *Evaluación técnico-económica de generación de biogás por digestión anaerobia a partir de residuos sólidos orgánicos generados en una industria restaurantera*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

ANEXOS

A.1. Balance de materia de la mezcla respecto al DQO

Prueba 4.

Datos:

$$DQO_i^I = 64,000 \text{ mg/L}$$

$$DQO_i^S = 30,200 \text{ mg/L}$$

Balance de materia en la mezcla de 50%/50% (200 ml) de inóculo y sustrato:

$$0.1 \left(64,000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) + (0.1) \left(30,200 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = (0.2) DQO_i^M$$

$$DQO_i^M = \frac{0.1 \left(64,000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) + (0.1) \left(30,200 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{(0.2)}$$

$$DQO_i^M = 47,100 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Después de la prueba BMP:

$$DQO_f^M = 33,800 \text{ mg/L}$$

$$DQO_f^I = 54,250 \text{ mg/L}$$

Total, de DQO_c^M consumido de la mezcla en la prueba:

$$DQO_c^M = 47,100 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 33,800 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 13,300 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Total, de DQO_c^I consumido en la prueba (testigo) para un volumen de 200 mL

$$DQO_c^I = 64,000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 54,250 \text{ mg/L}$$

$$DQO_c^I = 9,750 \text{ mg/L}$$

En 100 mL:

$$100\% \rightarrow 9,750 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$50\% = 4,875 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Total, de DQO_c^S sustrato consumido = $DQO_c^M - DQO_c^I$:

$$DQO_c^S = 13300 \frac{mg}{L} - 4,875 \frac{mg}{L} = 8,425 \frac{mg}{L}$$

o

$$DQO_c^S = 47,100 \frac{mg}{L} - 33,800 \frac{mg}{L} - 4,875 \frac{mg}{L}$$

$$DQO_c^S = 8,425 \text{ mg/L}$$

Total, de DQO_s^S sustrato sin consumir $DQO_s^S = DQO_i^S - DQO_c^S$:

$$DQO_s^S = 30,200 \frac{mg}{L} - 8,425 \frac{mg}{L} =$$

$$DQO_s^S = 21,775 \frac{mg}{L}$$

A.2. Rendimiento de metano a partir de la DQO

Datos:

Biogás prueba 4= **1353.33 mL**

Biogás inóculo = **165 mL**

Total, de biogás B_s^T menos el producido por el testigo (inóculo):

$$B_s^T = 1353.33 \text{ mL} - 165 \text{ mL}$$

$$B_s^T = 1188.33 \text{ mL}$$

Total, DQO^P de la penca:

$$DQO^P = 60,366.66 \frac{mg}{L}$$

Peso de sustrato en una concentración de **30,700 mg/L = 47.5 g**

Total, de gramos de sustrato (NOPAL) (g^N) respecto a la DQO , en un gramo:

$$\text{Gramos de nopal}(g^N) = \frac{60.36666 \frac{g}{L} DQO}{47.5 \text{ g}}$$

$$\text{Gramos de nopal}(g^N) = 1.27 \text{ g}$$

$$\text{Gramos de nopal}(g^N) = \frac{8.425 \frac{g}{L} DQO}{1.27 \frac{g}{L} DQO} = 6.63 \text{ g}$$

A.3. Rendimiento a biogás

$$R^B = \frac{1188.33 \text{ mL}}{6.63 \text{ g}} = 179.53 \frac{\text{mL biogás}}{\text{g nopal}}$$

A.4. Rendimiento a metano

Metano= 56%

$$R^m = \left(0.56 \frac{\text{metano}}{\text{mL biogás}}\right) \left(179.53 \frac{\text{mL biogás}}{\text{g nopal}}\right) = 100.5368 \frac{\text{mL metano}}{\text{g nopal}}$$

Cálculo de n para el biogás

$$n_{\text{biogás}} = \frac{PV}{RT} = \frac{(1 \text{ atm})(0.1795 \text{ L})}{\left(0.082 \frac{\text{Latm}}{\text{mol K}}\right)(308 \text{ K})} = 0.0071 \text{ moles de biogás}$$

Cálculo de n para el metano

$$PM_{CH_4} = 16 \text{ g/mol}$$

$$n_{\text{metano}} = \frac{PV}{RT} = \frac{(1 \text{ atm})(0.1005 \text{ L})}{\left(0.082 \frac{\text{Latm}}{\text{mol K}}\right)(308 \text{ K})} = 0.0040 \text{ moles de metano * gramo de nopal}$$

$$W_{CH_4} = (0.0040 \text{ mol } CH_4) * \left(\frac{16 \text{ g}}{\text{mol}}\right) = 0.0640$$

■