



---

**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DE PRETRATAMIENTOS: MECÁNICO,  
TÉRMICO Y QUÍMICO SOBRE SUSTRATOS DE LIRIO  
ACUÁTICO (*Eichhornia crassipes*) Y DE NOPAL (*Opuntia-ficus-  
indica*)**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADA POR:**

**DIANA SULEYMA ACOSTA GONZÁLEZ**

**Asesora Dra. Ma. del Carmen Chávez Parga**

**Co-asesor: Dr. José Apolinar Cortés**

**Morelia, Mich**

**Julio 2019**



Número de Oficio: 30/2019

P. I. Q. ACOSTA GONZALEZ DIANA SULEYMA PRESENTE

En contestación a su atenta solicitud de fecha 20 de Junio de 2019 me permito comunicarle a Usted, que se aprueba la opción de Titulación por TESIS propuesto para presentar Examen Recepcional en la Carrera de Ingeniero Químico.

El tema aprobado: Evaluación de Pretratamientos: Mecánico, Térmico y Químico sobre Sustratos de Lirio Acuático (Eichhornia crassipes) y de Nopal (Opuntia-ficus-indica) el cual se desarrollará bajo el siguiente índice:

RESUMEN

- I.- INTRODUCCIÓN (JUSTIFICACIÓN, OBJETIVO(S) E HIPÓTESIS)
II.- GENERALIDADES O MARCO TEÓRICO
III.- DESARROLLO DEL TRABAJO (METODOLOGÍA)
IV.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
REFERENCIAS

Además deberá de ajustarse al artículo 39 y 41, y podrá contemplar los puntos necesarios del artículo 40 de la reglamentación interno de la Facultad de Ingeniería Química en su capítulo VI.

Para tales efectos fungirá como asesor(a) el(la) DR. CHAVEZ PARGA MA. DEL CARMEN Profesor(a) de la Facultad de Ingeniería Química. La mesa de jurado para revisión y realización de este trabajo estará integrada por:

- DR. CHAVEZ PARGA MA. DEL CARMEN
DR. GUERRA GONZALEZ ROBERTO
DR. APOLINAR CORTES JOSE
DR. TELLEZ ARIAS MERCEDES GABRIELA
ING. TAPIA HUERTA JOSE LUIS

- PRESIDENTE 0700100-2
VOCAL 1 9700315-8
VOCAL 2 8203337-4
SUPLENTE 1 0800655-5
SUPLENTE 2 9700149-0

ATENTAMENTE

Morelia, Mich. A 20 de Junio de 2019.

[Handwritten signature]

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA





# FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



## PROGRAMA ACREDITADO

Morelia, Michoacán, a 04 de julio de 2019.

M. en C. LUIS NIETO LEMUS  
Director de la Facultad de  
Ingeniería Química de la U.M.S.N.H.  
PRESENTE.

Atendiendo a sus indicaciones se hizo la revisión de manuscrito de TESIS presentada por la P.I.Q.  
DIANA SULEYMA ACOSTA GONZÁLEZ CON MATRÍCULA 1220829G.

Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente a la interesada.

DR. CHÁVEZ PARGA MA. DEL CARMEN  
PRESIDENTE 07001002

DR. GUERRA GONZÁLEZ ROBERTO  
VOCAL 97003158

DR. CORTES JOSÉ APOLINAR  
VOCAL 82033374





# FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



## PROGRAMA ACREDITADO

No. Oficio 618/2018-2019  
Morelia, Michoacán, a 05 de julio de 2019  
Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

LIC. ULISES GUTIÉRREZ VÁZQUEZ  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN  
DE LA UNIVERSIDAD MICHOACANA  
P R E S E N T E.

Por este medio, me estoy permitiendo transcribir a esa Sección de Certificación a su digno cargo la comunicación enviada a esta Dirección por la mesa de jurado de examen Recepcional de esta fecha y que a la letra dice:

Atendiendo a las indicaciones se hizo la revisión de manuscrito de Tesis presentado por la pasante de Ingeniera Química: DIANA SULEYMA ACOSTA GONZÁLEZ con matrícula 1220829G.

Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente al interesado: ENTERADOS:

DR. CHÁVEZ PARGA MA. DEL CARMEN  
DR. GUERRA GONZÁLEZ ROBERTO  
DR. APOLINAR CORTES JOSÉ

07001002  
97003158  
82033374

Comunico a Usted lo anterior para los fines legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE

M. en C. LUIS NIETO LEMUS  
Director

De la Facultad de Ingeniería Química de la UMSNH



FACULTAD DE INGENIERÍA  
QUÍMICA

---

## RESUMEN

### **EVALUACIÓN DE PRETRATAMIENTOS: MECÁNICO, TÉRMICO Y QUÍMICO SOBRE SUSTRATOS DE LIRIO ACUÁTICO (*Eichhornia crassipes*) Y DE NOPAL (*Opuntia-ficus-indica*)**

Diana Suleyma Acosta González  
Julio 2019  
Licenciatura en Ingeniería Química  
Asesores  
Dra. Ma. del Carmen Chávez Parga  
Dr. José Apolinar Cortés

El Lirio acuático es una planta que se considera una plaga dentro de los cuerpos de agua ya que causa un daño importante a los ecosistemas, a su vez, el Nopal es considerado como un residuo ya que descartan alrededor de 10 toneladas por corte. Estos materiales son considerados como residuos y pueden ser viables para la generación de combustibles previo pretratamiento. Los pretratamientos combinados que se evaluaron en el presente trabajo fueron mecánico, térmico y químico; para realizar la ruptura de macromoléculas y favorecer su biodisponibilidad en el proceso de anaerobiosis. La metodología empleada consistió en la molienda de ambos materiales y posteriormente se realizó el pretratamiento mecánico-térmico a 60 °C y el pretratamiento mecánico-térmico-químico a 60 °C y ajuste del pH con óxido de calcio (CaO) a valores de 8 y 6 para Lirio acuático y Nopal, respectivamente, utilizando la demanda química de oxígeno soluble (DQOs) y los ácidos grasos volátiles AGV's) como parámetros de evaluación de la biodisponibilidad. Los resultados mostraron que el tiempo de enfriamiento para el Lirio acuático fue de 90 minutos, mientras que para el Nopal fue de 140 minutos. En lo que respecta al pretratamiento mecánico térmico se obtuvo una DQOs mayor para el Nopal que para el Lirio acuático; los AGV's por el contrario fueron mayores en el Lirio acuático que para el Nopal. En el pretratamiento mecánico térmico-químico la DQOs fue mayor para el Nopal que el Lirio acuático observándose que éstas son menores que en el pretratamiento mecánico-térmico; los AGV's se incrementaron para el Lirio acuático, mientras que estos se consumieron para el Nopal. La aplicación de pretratamientos sobre los sustratos Lirio acuático y Nopal, permite incrementar su biodisponibilidad, ya que aumenta la cantidad de sustancias solubles medidas como demanda química de oxígeno soluble y la cantidad de ácidos grasos volátiles.

PALABRAS CLAVE: BIODISPONIBILIDAD, SUSTRATOS, ANAEROBIOSIS, DETERMINACION DE DQOs, DETERMINACION DE AGVs.

---

## ABSTRACT

### PRETREATMENTS EVALUATION: MECHANICAL, THERMAL AND CHEMICAL ON SUBSTRATES LILI AQUATIC (*Eichhornia crassipes*) AND NOPAL (*Opuntia-ficus-indica*)

Diana Suleyma Acosta González  
Julio 2019  
Licenciatura en Ingeniería Química  
Asesores  
Dra. Ma. del Carmen Chávez Parga  
Dr. José Apolinar Cortés

The water lily is a plant that is considered a plague within the bodies of water because it causes a significant damage to ecosystems, in turn; the Nopal is considered a waste since they discard around 10 tons per cut. These materials are considered as waste and can be viable for fuel generation after pretreatment. The combined pretreatments that were evaluated in the present work were mechanical, thermal and chemical to make the decomposition of macromolecules and make them more bioavailable in the anaerobiosis process. The methodology consisted of the grinding of both materials and then the mechanical-thermal pretreatments that was carried out at 60 °C and the mechanical-thermal-chemical treatment at 60 °C and adjustment of the pH with CaO to values of 8 and 6 for water lily and Nopal, respectively, using the soluble chemical oxygen demand (COD<sub>S</sub>) and the volatile fatty acids (VFAs) as bioavailability evaluation parameters. The results showed that the cooling time for the water lily was 90 minutes, while for the Nopal was 140 minutes. Regarding the mechanical-thermal pretreatment, a higher COD was obtained for the Nopal than for the water lily; the VFAs the other side was greater in the water lily than the Nopal. In the mechanical-thermal-chemical pretreatment the COD<sub>S</sub> was bigger the Nopal than the water lily, showing that these are smaller than in the mechanical-thermal pretreatment; the VFAs were increased for the water lily, while these were consumed for the Nopal. The application of pretreatments on the substrates, water lily and Nopal, allows to increase its bioavailability, since it increases the amount of soluble substances measured as soluble chemical oxygen demand and the amount of volatile fatty acids.

---

## DEDICATORIA

*A mi Abuelita que guía mis pasos desde allí arriba, por cuidarme y protegerme, siempre estarás en nuestros corazones.*

*A mis padres Que sin ellos no hubiera logrado una meta más en vida profesional, por su apoyo incondicional. A mi padre por tantas horas de trabajo dedicado para poder solventar mis estudios y a mi madre por tantas noches de preocupación y de desvelo que le he causado.*

*A mi Hija Leilanni Yamilet por existir en mi vida y ser mi fuerza para seguir día a día luchando, te quiero mucho mi niña hermosa.*

---

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** que me dio la fe, salud, esperanza e iluminar mis conocimientos y darme la fuerza para concluir este proyecto.

A **mi hija Leilanni Yamilet** por estar aquí conmigo, ser mi inspiración mayor para continuar con más fe.

A **mis hermanos Jessica, Laura y Omar** por estar siempre presentes y su apoyo incondicional.

A **mis Abuelitos** por su apoyo con mi mamá y con todos nosotros.

A **Noé** por estar siempre en cada momento importante, por sus enseñanzas, consejos, apoyo incondicional, tiempo brindado y confianza.

Al **Dr. José Apolinar Cortés** y **Dra. Ma. del Carmen Chávez Parga** por permitirme trabajar junto a ellos, su confianza, paciencia, enseñanzas compartidas, además del tiempo dedicado. Gracias por contribuir en mi formación profesional para poder culminar este proyecto de tesis. Al **Dr. Roberto Guerra González** por formar parte de la mesa sinodal como revisor de la tesis.

A la **M. en C. Remedios Cisneros Magaña** por permitirme realizar mi servicio social, por brindarme su confianza y por sus enseñanzas.

A **Iris y Julio** por compartir conmigo trabajo, alegrías y tristezas durante todo el desarrollo de este trabajo por su ayuda, tiempo, consejos, y apoyo.

A **mis amigos Diana, Lupita R., Lupita C., Yuni, Jorge, Juan, Benja y Germán** a quienes agradezco por su compañerismo y por todas las experiencias que vivimos, por su apoyo y su gran amistad, conocí en cada uno de ustedes a personas con grandes cualidades y sentimientos.

A **mis Tías, Tíos y Primos** por su apoyo y consejos.

A la **Facultad de Ingeniería Química** y al **Posgrado de Ingeniería Química** por darme la oportunidad de superarme profesionalmente y lugar donde conocí personas con quienes mantengo una amistad.



---

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
GLOSARIO	XI
NOMENCLATURA	XII
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Generalidades	2
1.1.1 Lirio Acuático	2
1.1.2. Características del Lirio acuático	3
1.1.3. Producción de Lirio acuático	3
1.1.4. Nopal ( <i>Opuntia ficus indica</i> )	3
1.1.5. Características del Nopal ( <i>Opuntia ficus indica</i> )	3
1.1.6. Producción de Nopal ( <i>Opuntia ficus indica</i> )	4
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
2.1. Lirio Acuático	6
2.1.1. Clasificación taxonómica	6
2.1.2. Descripción de la especie	6
2.1.3. Otros usos del Lirio acuático	7
2.2. Nopal <i>Opuntia</i>	7
2.2.1. Clasificación taxonómica	7
2.2.2. Descripción del Nopal	8
2.2.3. Tipos y características de <i>Opuntia</i>	9
2.3. Digestión anaerobia	10
2.3.1. Proceso de digestión anaerobia	10
2.3.2. Etapas de la anaerobiosis	11
2.4. Parámetros de control en la anaerobiosis	12

2.5. Biodisponibilidad	13
2.5.1.. ¿Por qué es importante la biodisponibilidad?	13
2.5.2 ¿Cómo se incrementa la biodisponibilidad?	13
2.6. Antecedentes	14
2.6.1. Antecedentes Históricos	14
2.6.1.1. Lirio Acuático en México	14
2.6.1.2. Lirio acuático en el Lago Pátzcuaro	14
2.6.1.3. Composición Química del Lirio acuático	15
2.6.1.4. Nopal desde finales del siglo XX	16
2.6.1.5. Composición Química del Nopal <i>Opuntia</i> <i>ficus - indica</i>	16
2.7. Pretratamiento	17
2.7.1. Pretratamientos físicos o mecánicos	17
2.7.2. Pretratamientos químicos	18
2.8. Planteamiento del problema	19
2.9. Justificación	19
2.10. Hipótesis	19
2.11. Objetivo general	19
2.11.1 Objetivos específicos	20
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</b>	21
3.1. Lirio acuático	22
3.1.1. Recolección	22
3.1.2. Almacenamiento	22
3.1.3. Troceado	23
3.1.4. Pesaje	23
3.1.5. Molienda	23
3.1.6. Caracterización del Lirio acuático	24
3.1.7. Dilución	25
3.1.8. Aplicación de Pretratamiento	26
3.1.9. Agitación	27
3.1.10. Seguimiento del pretratamiento durante el tiempo de enfriamiento	28
3.2. Nopal <i>Opuntia ficus indica</i>	30

---

3.2.1. Almacenamiento	30
3.2.2. Troceado	30
3.2.3. Pesaje	31
3.2.4. Molienda	31
3.2.5. Caracterización	32
3.2.6. Dilución	33
3.2.7. Aplicación de Pretratamiento	34
3.2.8. Agitación	35
3.2.9. Seguimiento del pretratamiento durante el tiempo de enfriamiento	35
<b>CAPITULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>39</b>
4.1. Pretratamiento mecánico - térmico del Lirio acuático y Nopal	40
4.1.1. Resultado del tiempo de enfriamiento	40
4.1.2. DQO <sub>T</sub> al Inicio y final del pretratamiento	41
4.1.3. Demanda Química de Oxígeno soluble (DQO <sub>S</sub> )	41
4.1.4. Ácidos Grasos Volátiles (AGV's)	42
4.2. Pretratamiento mecánico - térmico - químico de Lirio acuático y Nopal	44
4.2.1. Resultado de tiempo de enfriamiento	44
4.2.2. Demanda Química de Oxígeno soluble (DQO <sub>S</sub> )	45
4.2.3. Ácidos Grasos Volátiles (AGV's)	46
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES</b>	<b>48</b>
5.1. Conclusiones	49
<b>CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>50</b>
6.1. Bibliografía	51

---

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1. Clasificación Taxonómica de <i>Eichhornia crassipes</i>	6
Tabla 2. Taxonomía del Nopal	8
Tabla 3. Composición química del Lirio acuático en función del estado de madurez	15
Tabla 4. Composición química del Nopal <i>Opuntia ficus indica</i> con base a 100 g de materia fresca y la fibra en peso seco	16
Tabla 5. DQO <sub>T</sub> al inicio y final	41

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Componentes del Lirio acuático	7
Figura 2. Diagrama de la anaerobiosis	10
Figura 3. Impacto del Lirio acuático en lago de Pátzcuaro	15
Figura 4. Recolección de Lirio acuático	22
Figura 5. Almacenamiento de Lirio acuático	22
Figura 6. Troceado del Lirio acuático	23
Figura 7. Peso a utilizar Lirio acuático	23
Figura 8. Molienda del Lirio acuático	24
Figura 9. Metodología de la caracterización del concentrado de Lirio acuático	25
Figura 10. Proceso para pretratamiento mecánico - térmico	26
Figura 11. Proceso para pretratamiento mecánico – térmico - químico	27
Figura 12. Agitación del concentrado	27
Figura 13. Dilución 1:100 del Lirio acuático	28
Figura 14. Vial para DQO <sub>T</sub>	29
Figura 15. Filtración de la dilución 1:100	29
Figura 16. Dilución filtrada	30
Figura 17. Almacenamiento del Nopal	30
Figura 18. Troceado del Nopal	31
Figura 19. Peso del Nopal a utilizar	31
Figura 20. Molienda del Nopal	32
Figura 21. Metodología de la caracterización del concentrado del Nopal	33
Figura 22. Proceso para pretratamiento mecánico - térmico	34
Figura 23. Proceso para pretratamiento mecánico – térmico - químico	35
Figura 24. Agitación del concentrado	35
Figura 25. Dilución 1:100 del Nopal	36
Figura 26. Vial para DQO <sub>T</sub>	37
Figura 27. Filtración de la dilución 1:100	37



---

Figura 28. Diluciones filtradas	38
Figura 29(a). Enfriamiento del Lirio	40
Figura 29(b). Enfriamiento del Nopal	41
Figura 30(a). Incremento de DQO <sub>S</sub> del Lirio acuático	42
Figura 30(b). Incremento de DQO <sub>S</sub> del Nopal	42
Figura 31(a). Formación de AGV's del Lirio acuático respecto al tiempo	43
Figura 31(b). Formación de AGV's del Lirio acuático respecto al tiempo	43
Figura 32(a). Enfriamiento mecánico - térmico-químico del Lirio acuático	44
Figura 32(b). Enfriamiento mecánico - térmico-químico del Nopal	45
Figura 33(a). DQO <sub>S</sub> del Lirio acuático respecto al tiempo	46
Figura 33(b). DQO <sub>S</sub> del Nopal respecto al tiempo	46
Figura 34. AGV's del Lirio acuático respecto al tiempo	47
Figura 35. Comparación de DQOs y AGV's del Lirio acuático respecto al tiempo	47

---

## GLOSARIO

**Digestión anaerobia:** Es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno.

**Anaerobiosis:** Capacidad que poseen algunos organismos, como hongos, bacterias, parásitos, etc., para vivir sin oxígeno molecular libre.

**Hidrólisis:** Etapa donde se rompen las moléculas.

**Acidogénesis:** Implica la conversión bacteriana de los compuestos producidos en la primera etapa de la digestión anaerobia, proceso a través del cual bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de energía.

**Acetogénesis:** Etapa donde se convierten los ácidos grasos y alcoholes en acetato.

**Metanogénesis:** es la formación de metano por parte de los seres vivos.

**pH:** Unidad de medida de alcalinidad o acidez de una solución.

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.

**Ácidos Grasos Volátiles (AGV's):** son cadenas cortas de menos de seis carbonos.

**Biodisponibilidad:** Grado de absorción de distintos nutrientes que un organismo puede utilizar.

**Pretratamiento Mecánico:** Reducir el tamaño de la materia por medio de diferentes tipos de molienda.

**Pretratamiento Térmico:** procesos donde la biomasa se expone a altas temperaturas.

**Pretratamiento Químico:** Pretratamiento que se basa en la utilización de sustancias químicas.

---

## NOMENCLATURA

AGV's	Ácidos Grasos Volátiles
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Calcio
CH <sub>3</sub> COOH	Ácido Acético
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CaO	Óxido de calcio
DQO <sub>T</sub>	Demanda Química de Oxígeno Total
DQO <sub>S</sub>	Demanda Química de Oxígeno Soluble
H <sub>2</sub> O	Agua
pH	Potencial de hidrógeno

# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

La crisis energética que se vive actualmente originada por el carácter no renovable de los combustibles fósiles, ha llevado a investigación de nuevas tecnologías y nuevos recursos energéticos. (Gómez y col., 2012). La sustitución de los hidrocarburos por fuentes alternas sustentables, se ha considerado como una prioridad de los últimos años (Morero y Campanella, 2013), por todo esto, el incremento en el abastecimiento energético, la reducción de la dependencia de fuentes de energía de origen fósil y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero se encuentran entre los principales motivos que han llevado a los diferentes países a impulsar la producción de biocombustibles en la búsqueda de una sociedad sustentable (Salazar y col., 2012; Cervi y col., 2011; Manzonea y col., 2015; Souza y Schaeffer, 2013).

La necesidad de uso de energías alternativas inagotables, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente enfatiza el ingenio de personas en todos los ámbitos de la ciencia. Una fuente alternativa importante es la biomasa, la cual tiene la ventaja de que permite reemplazar carbón de forma sustentable (Van der Stelt, 2011). A partir del año 2010, la biomasa sólida representó la mayor fuente de energía renovable (García-Ubaque y col., 2013); sin embargo, para la correcta implementación del uso de ésta, se requiere el desarrollo de investigaciones que permitan la adopción de tecnologías relacionadas con la biomasa (Sánchez y Cardona, 2008; Cornoa y col., 2014). Una parte importante de la biomasa, se obtiene a través de los residuos y/o malezas que presentan efectos adversos sobre el medio ambiente, tal es el caso de Lirio acuático *Eichhornia crassipes* y del Nopal *Opuntia-ficus-indica*.

#### 1.1.1 Lirio Acuático

El Lirio acuático *Eichhornia crassipes* es una planta considerada plaga, debido a que su reproducción desmedida causa serios problemas en embalses, ríos, lagos y presas porque genera eutrofización, evapotranspiración e interfiere con la luz solar que penetra el agua afectando la supervivencia de otras especies acuáticas y la navegación, por lo que esta planta ha sido considerada como una maleza. La remoción de los cuerpos de agua generará una mejora en la calidad del agua y la vida de las especies acuáticas (Pensemosverdemx, 2018).

El lago de Pátzcuaro cuenta con una extensa plaga de Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) que está causando la dificultad para la pesca así como la vivencia de especies acuáticas y al ser un desecho, puede significar un recurso para utilizarse como materia prima para la elaboración de biocombustible (Aguirre, 2017).



### **1.1.2. Características del Lirio acuático**

Especie flotante de raíces sumergidas, con hojas color verde y flores color violeta, áreas pertenecientes a la familia de las Pontederiaceas, que carece de tallo aparente, provista de un rizoma, muy particular, emergente, del que se abre un rosetón de hojas que tiene una esponjosa notablemente inflada en forma de globo que forma una vejiga llena de aire, mediante el vegetal puede mantenerse sobre la superficie acuática, el limbo se estrecha en la zona media, terminando en una especie de lengüeta plana y redonda (Juárez, 2011).

### **1.1.3. Producción de Lirio acuático**

Se ha registrado una extensa producción de Lirio acuático en diferentes estados: Campeche, Chiapas, Coahuila, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Querétaro, Quintana Roo, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán (Heike, 2009).

### **1.1.4. Nopal (*Opuntia ficus indica*)**

Nopal *Opuntia-ficus-indica*, pertenece a la familia de cactáceas angiospermas dicotiledóneas, es una planta tropical o subtropical. El Nopal como residuo puede ser aprovechado como materia prima y como fuente de energía, y se ha demostrado que es una biomasa, con elevado porcentaje de hidratos, bajo contenido de lignina y una elevada relación C/N/P, que satisface las funciones vitales de los consorcios microbianos, por lo que es considerado un sustrato apropiado para la digestión anaerobia (Ruiz y col., 2011).

### **1.1.5. Características del Nopal (*Opuntia ficus indica*)**

Es una planta que puede alcanzar entre 3 y 6 metros de altura, formada por tallos suculentos, con pencas elipsoidales de color verde que miden de 30 a 60 centímetros (cm) de largo, por 20 – 40 cm de ancho y 2 – 3 cm de grosor, que en edad adulta reciben el nombre de cladodios. El tejido de las pencas es grueso, y transpira a través de estomas, que son pequeños orificios en la superficie del tejido que permiten el intercambio de gases (Martínez-Centelles, 2012).

### **1.1.6. Producción de Nopal (*Opuntia ficus indica*)**

La producción del Nopal es muy extensa en México, y los estados que contribuyen con la mayor producción son: Morelos, San Luis Potosí, Puebla, Michoacán, Guanajuato, Jalisco y Oaxaca (Gómez, 2015).

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

### 2.1 Lirio Acuático

#### 2.1.1. Clasificación Taxonómica

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).

**Tabla 1.** Clasificación Taxonómica de *Eichhornia crassipes*

Rango	Nombre Científico
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Orden	<i>Pontederiales</i>
Familia	<i>Pontederiaceae</i>
Genero	<i>Eichhornia</i>
Especie	<i>Eichhornia crassipes</i>

#### 2.1.2. Descripción de la especie

**Hábito y forma de vida:** Planta acuática libremente flotadora o fija al sustrato, perenne.

**Tamaño:** Muy variable en tamaño, normalmente alrededor de 30 cm. Puede formar matas flotantes grandes.

**Tallo:** Reducido, estolonífero, aunque el tallo horizontal (rizoma) alargado conecta a diferentes individuos.

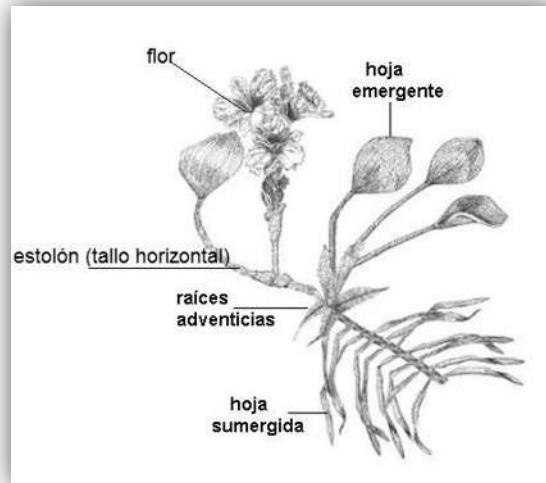
**Hojas:** Formando una roseta basal, los pecíolos largos y cilíndricos en las plantas fijas al sustrato (de 3 a 60 cm de largo), y cortos y globosos en las plantas flotantes, las láminas de las hojas casi circulares o más anchas que largas, de 2.5 a 16 cm de largo y 3 a 12 cm de ancho, ápice truncado, redondeado a ligeramente obtuso, base truncada a algo cordada.

**Inflorescencia:** Espiciforme, con 4 a 16 flores solitarias y alternar a lo largo del pedúnculo, de 6 a 26 cm de largo, grueso.

**Flores:** Grandes (hasta de 5 cm de largo) de color lila, variando del azul a morado, rara vez blanca, con pelillos, con la base tubulosa y hacia el ápice dividida en 6 segmentos desiguales, 3 externos y 3 internos, uno de éstos más ancho y con una mancha amarilla; 6 estambres con pelos glandulares en los filamentos, 3 de ellos más largos, las anteras aflechadas, de un tono azul.

**Frutos y semillas:** El fruto es una cápsula elíptica, de más o menos 1.5 cm de largo, con 3 ángulos. Las semillas numerosas, de poco más de 1 mm de largo, con 10 costillas longitudinales, de color negruzco.

**Raíz:** Fibrosas, comúnmente coloreadas.



**Figura 1.** Componentes del Lirio acuático

### 2.1.3. Otros usos del Lirio acuático

1.- Si algo caracteriza al Lirio acuático es su habilidad para retener metales pesados como el manganeso, aluminio y el cobre, que no son benéficos para muchos seres vivos. Su manejo depende, de manera importante, de su grado de contaminación y tiene una alta capacidad de absorber contaminantes.

2.- La empresa Tecnología Especializada en el Medio Ambiente (TEMA) elabora con Lirio acuático, una fibra que puede emplearse en la atención de derrames y en el reciclaje de sustancias orgánicas o industriales, esta alternativa productiva permite controlar el exceso de Lirio acuático en los mantos acuíferos mexicanos.

## 2.2. Nopal *Opuntia*

### 2.2.1. Clasificación taxonomía

La taxonomía es muy compleja debido a que sus fenotipos varían de acuerdo a las condiciones ambientales (Saenz, 2006).



**Tabla 2.** Taxonomía del Nopal

Reino	Vegetal
División	<i>Angiospermae</i>
Clase	<i>Dicotyledonea</i>
Orden	<i>Opuntiales</i>
Familia	<i>Cactaceae</i>
Género	<i>Opuntia</i>
Especie	<i>Ficus</i>
Variedad	<i>Indica</i>
Nombre científico	<i>Opuntia ficus indica</i>
Nombre común	Nopal, higo chumbo, tuna etc.

### 2.2.2. Descripción del Nopal

Es una de las plantas cácteas de mayor importancia agronómica del mundo y 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, las hacen adaptable al medio árido tienen relación con la conformación de varios de sus órganos, según Nobel (2003) sus raíces superficiales y extendidas captan el agua de las escasas lluvias que caen en esos ambientes.

El Nopal es una planta arbustiva, erecta o rastrera, que puede alcanzar entre 3 y 6m de altura y ocupa grandes extensiones, la planta está formada por tallos suculentos, engrosados, elípticos y de color verde, llamados pencas (Sudzuki y col., 1993; Sudzuki, 1999; Villegas y de Gante, 1997).

Las pencas realizan un mecanismo de adaptación en las plantas cácteas a los climas desérticos, botánicamente, las pencas reciben el nombre de cladodios y son tallos con aspecto de hojas. El tejido de estas estructuras es grueso para evitar la pérdida de agua.

Sobre ambas caras de los cladodios hay yemas llamadas areolas que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces, una vez que los cladodios están completamente desarrollados tienen 52 - 69 areolas por cada cara y a su vez cubierta por una gruesa cutícula que los protege de los insectos y patógenos, esta cutícula tiene la peculiaridad de ser de color blanquecino lo que permite reflejar gran parte de la radiación solar permitiendo que la planta tolere hasta los 60 °C propio de un ambiente desértico, durante el día sus estomas que están en las pencas se mantienen cerrados para evitar la pérdida de agua, abriéndose en la noche es decir cumpliendo un patrón nocturno para que el paso de dióxido de carbono y la pérdida de vapor de agua ocurra en el momento más fresco del día, a este patrón se lo conoce como Metabolismo del ácido crasuláceo (MAC), generalmente las plantas nativas de zonas áridas y semiáridas propensas a sequías poseen este metabolismo (Nobel, 2003), los tallos con el tiempo pueden transformarse en tallos leñosos, de color ocre

intenso a grisáceo (Álvarez, 2007). Los tallos suculentos y articulados o cladodios, comúnmente llamados pencas, presentan forma de raqueta ovoide o elipsoide alcanzando hasta 60-70 cm de longitud, dependiendo del agua y de los nutrientes disponibles. Cuando miden 10 - 12 cm son tiernos y reciben el nombre de Nopalitos, se pueden consumir como verdura. El aumento del área del cladodio dura alrededor de 90 días (Sudzuki y col., 1999).

### 2.2.3. Tipos y características de *Opuntia*

La clasificación de los Nopales es muy compleja por varias razones ya mencionadas. Sólo un intenso trabajo de campo puede permitir reconocer e identificar las especies, sus variedades y adaptaciones reflejadas en su fenotipo (Scheinvar, 1999). Se conocen casi 300 especies del género *Opuntia*. Sin embargo, hay solo 10 o 12 especies que hasta ahora son utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta, Nopalitos, alimentación humana, forraje, cochinilla y obtención de colorante.

Entre ellas se encuentran:

- ❖ Especies que son cultivadas para producción de fruta: *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *Opuntia xocconostle*, *Opuntia megacantha* y *Opuntia streptacantha*.
- ❖ Especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. robusta*.
- ❖ De las especies citadas, la más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia-ficus-indica*.

En la cuenca del Mediterráneo la única especie que se cultiva es la *Opuntia* (Uzun, 1996) y se emplea con diferentes propósitos. Las características de estas especies son variables, diferenciándose en la forma de los cladodios, también en la presencia o ausencia de espinas, en el tamaño y color de los frutos y en otras características botánicas. Por ejemplo, los frutos de *Opuntia ficus-indica* son dulces, jugosos, de color amarillo, anaranjado, rojo o púrpura, con mucha pulpa y cáscara de grosor variable, pero generalmente delgada. Los frutos de *O. xocconostle* o tuna *Cardona* son más pequeños, de sabor ácido, exteriormente de color verde-púrpura y en el interior tienen un color rosado. *Opuntia streptacantha* produce frutos de color púrpura, jugosos y dulces (Scheinvar, 1999), no muy resistentes para su manejo, de fácil descomposición y maduran muy rápidamente lo que impide una comercialización en gran escala.

### 2.3 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es el proceso en el cual la materia orgánica es descompuesta, obteniendo como productos principales el biogás (una mezcla aproximadamente de 65% de metano y 35% de dióxido de carbono). Junto con una baja producción de biomasa (Mata, 2003).

La digestión anaerobia, presenta ventajas y desventajas, dentro de la primeras se encuentra; que el proceso no se ve limitado por la cantidad de oxígeno a abastecer ya que este no es requerido, lo que lleva al ahorro de energía utilizada para el suministro de oxígeno, la generación de lodos es lenta (0.1-0.4 kg de biomasa/kg de DBO eliminada) provocando que los tiempos de purga sean mayores, así mismo permiten la recuperación de energía en forma de metano por lo tanto los costos de operación y mantenimiento son bajos. Las desventajas que se presentan son; la producción ácido sulfhídrico (Terrenos y col., 2009).

#### 2.3.1 Proceso de digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. Los estudios realizados, dividen el proceso de descomposición anaerobia en tres partes: hidrólisis, Acidogénesis y Metanogénesis; consideran a la Acetogénesis como la parte de la Acidogénesis (Winkler, 2008; Ramalho, 2003 y Metcalf y Eddy, 2003). En la Figura 2, se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaerobia y los productos intermedios generados.

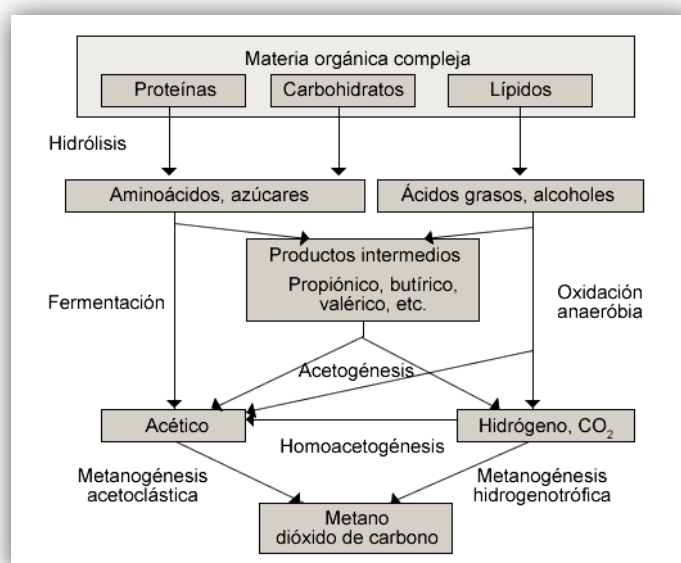


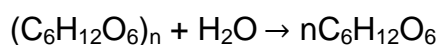
Figura 2. Diagrama de la anaerobiosis

### 2.3.2. Etapas de la anaerobiosis

Diversos autores hacen referencia a solo tres etapas consecutivas durante el proceso de anaerobiosis, tomando como una sola etapa la Acidogénesis y Acetogénesis, pero visto de un modo más detallado este proceso biológico está comprendido mediante cuatro etapas (Gerardini, 2003):

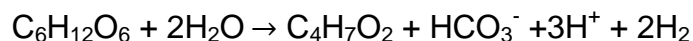
- Hidrólisis:

Esta etapa la hidrólisis realiza una ruptura de materia orgánica compleja (proteínas, carbohidratos, lípidos) hasta monómeros, obteniendo moléculas más simples (aminoácidos, azúcares y alcoholes). Esta fase es relativamente lenta y puede ser la etapa limitante de la digestión anaerobia (ejemplo: *Clostridium*, *Staphylococcus* y *Bacteroides*).



- Acidogénesis:

Es la conversión de monómeros en ácidos orgánicos (lácticos, succínico, etc.) alcoholes y cetonas (metanol, etanol, glicerol, acetona)  $CO_2$  e  $H_2$ . El acetato es el producto principal (*Clostridium*, bacterias del ácido láctico).



- Acetogénesis:

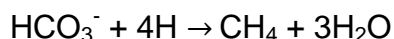
Es la etapa donde se convierten los ácidos grasos y alcoholes en acetato,  $CO_2$  e  $H_2$ , que son utilizados por las metanogénicas.



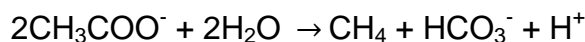
- Metanogénesis:

Las arqueobacterias metanogénicas son las más sensibles al  $O_2$  de los microorganismos conocidos. No pueden utilizar productos orgánicos complejos y su metabolismo energético está dirigido hacia la producción de  $CH_4$  como único producto final.

- Metanogénicas hidrogenotróficas (1/3 del  $CH_4$ ). *Methanobacterium*, *Methanospirillum*.



- Metanogénicas acetotróficas o acetoclásticas (2/3 del  $CH_4$ ). *Methanosarcina*, *Methanosaeta*.



### 2.4. Parámetros de control en la anaerobiosis

Los pretratamientos están influenciados por una serie de parámetros que determinan su biodisponibilidad, como son: temperatura, pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) y Ácidos Grasos Volátiles (AGV's).

- **Temperatura**

La temperatura es un parámetro importante para el desarrollo de la digestión anaerobia ya que, determina las especies existentes así como la alteración de la actividad de las enzimas y por tanto, varía la velocidad de los microorganismos. El rango de temperatura para la digestión anaerobia varía entre 10 y 60 °C. Sin embargo, las temperaturas óptimas, son la mesófila (30 – 45 °C y la termófila (45 - 60) °C. Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperatura mesófila, siendo la óptima 35 °C (Zabranzca y col., 2000).

Un incremento de la temperatura ejerce dos tipos de efectos opuestos sobre los microorganismos ya que a medida que se da este, las reacciones químicas y enzimáticas se aceleran conjuntamente con el crecimiento bacteriano, sin embargo. Por encima de cierta temperatura algunas proteínas particulares pueden sufrir daños irreversibles y llevar a la completa disminución de la actividad bacteriana.

- **pH**

El pH para la digestión anaerobia se sitúa entre 6.8 y 8, ya que está directamente relacionado con la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV's) en el medio, si el pH aumenta o disminuye demasiado, puede eliminar la existencia de algunas bacterias.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Es la cantidad de oxígeno en mg/l consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua. Se emplean oxidantes químicos, como el dicromato potásico en un ambiente ácido teniendo como catalizador sulfato de plata. La DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse.

- **Ácidos grasos volátiles (AGV's)**

Los AGV's son productos intermedios pueden ser: ácido acético, butírico, propiónico y valérico, estos deben de mantenerse en una concentración adecuada (entre 2000 y 3000 mg/L de ácido Acético), ya que si esta es baja no será de un rendimiento óptimo.

### **2.5. Biodisponibilidad**

Por biodisponibilidad se entiende el grado de absorción de los distintos nutrientes que un organismo puede utilizar, para realizar sus actividades metabólicas. El grado de biodisponibilidad varía con numerosos factores, ya que ésta es diferente dependiendo del tipo de nutriente de que se trate, y el grado de absorción está en función de los mecanismos que posee el organismo para incorporarlos. Por tanto independientemente de los factores que puedan afectarlos, los grados de biodisponibilidad de los diferentes nutrientes suelen ser distintos y específicos para cada uno de ellos dentro de los límites propios.

#### **2.5.1. ¿Por qué es importante la biodisponibilidad?**

La biodisponibilidad de cualquier nutriente es importante debido a que éste puede ser fácilmente incorporado al organismo. Para el caso específico de los procesos biológicos anaerobios su consumo directo por los consorcios bacterianos, permite una rápida asimilación, lo cual trae como consecuencia, menores tiempos de degradación de los sustratos, disminución en los tamaños de los reactores biológicos y costos en la operación.

#### **2.5.2. ¿Cómo se incrementa la biodisponibilidad?**

En los procesos biológicos anaerobios los tiempos de degradación pueden ser prologados debido a que en muchos de los casos los consorcios microbianos tienen que asimilar moléculas de estructura compleja. Específicamente en la etapa de hidrólisis en donde se realiza la función de la ruptura de la macromolécula.

La biodisponibilidad se puede incrementar a través de diversos pretratamientos de tipo mecánico, térmico y químico esto con el fin de realizar la ruptura por hidrólisis de las moléculas complejas y permitir que compuestos de menor peso molecular sean fácilmente asimilables.

Específicamente para los materiales de origen vegetal como el Lirio acuático (nombre científico) y el Nopal (nombre científico), la aplicación de los pretratamientos tienen como finalidad el romper estructuras complejas del tipo lignínico y hemicelulósico.

### 2.6 Antecedentes

#### 2.6.1 Antecedentes Históricos

##### 2.6.1.1 Lirio Acuático en México

El Lirio acuático llegó a México en los últimos años en el siglo diecinueve y en 1897 aparece en algunos lugares de la Ciudad de México. Se ignora cómo llegó al Lago de Chapala, pero ahí se reprodujo con tal rapidez que comenzó a dar problemas y en Xochimilco en 1912 el Lirio acuático apareció, como una parte de la flora, por lo que esta planta persistió hasta los últimos años del siglo veinte. Desde 1906 se escribió el primer reporte en el que ya se le considera como plaga.

No se sabe con certeza quién la trajo a México; en algunos artículos científicos se señala que fue durante el porfiriato cuando un funcionario ordenó su introducción al país, de lo que no hay duda, gracias a los registros botánicos en finales del siglo XIX, la planta ya flotaba en los canales de Xochimilco en 1897.

En las aguas amazónicas evolucionó y ahí permaneció hasta que alguien, admirado por su delicada flor que flota como barquito de papel, decidió llevarla consigo para mostrarla a otros ojos. Ese simple acto, tomarla y sacarla de su hábitat, cambió su historia para los mantos acuíferos. (Gómez, 2015) La planta llegó a otras tierras, a otras aguas y comenzó a reproducirse sin control y dejó de ser un frágil barquito.

##### 2.6.1.2. Lirio acuático en el lago de Pátzcuaro

El Lago de Pátzcuaro ha sido afectado de manera histórica por la acumulación y combinación de efectos provocados por la actividad humana desde hace aproximadamente 4000 años.

Los impactos severos sobre el cuerpo de agua iniciaron alrededor de los años 30, principalmente con la calidad del agua, la condición del hábitat del lago y el aspecto biológico.

El Lago de Pátzcuaro se ubicado a 63 kilómetros al oeste de Morelia, es un lago con una historia antigua, formado por varios cientos de miles de años antes de que el primer hombre moderno pisara la tierra. De acuerdo con los expertos es un lago con condiciones históricas, ambientales más estables que otros cuerpos de agua vecinos (Juan, 2012), es un cuerpo acuático rodeado de un sinnúmero de sitios de interés, por lo que es considerado como uno de los lugares turísticos más populares de nuestro estado.



Una pérdida en la calidad del agua, las causas son la acumulación de sedimentos y materia orgánica acarreada desde la parte alta de la cuenca, la introducción de plantas acuáticas que se han convertido en malezas desde 1930, así como su inadecuado manejo desde hace más de 20 años (Ramírez-Herrejón, 2012).

Las malezas acuáticas pueden cubrir totalmente la superficie del agua e impedir el paso de luz y el intercambio gaseoso entre el cuerpo de agua y la atmosfera; por esta razón en las zonas cubiertas por Lirio acuático el agua es oscura y presenta bajos niveles de oxígeno disuelto, lo que impide que muchos seres vivos puedan habitar en estas zonas, incluyendo peces.



**Figura 3.** Impacto del Lirio acuático en Lago de Pátzcuaro

### 2.6.1.3. Composición Química del Lirio acuático

El conocimiento de la composición química Lirio acuático, es fundamental para los objetivos de este trabajo, ya que la aptitud de su biomasa puede ser convertida en biogás (Juárez Luna, 2011).

**Tabla 3.** Composición química del Lirio acuático en función del estado de madurez

Concepto	Contenido %	
	Hoja	Tallo
Lignina	11.5	2.52
Hemicelulosa	24.08	25.14
Celulosa	22.3	17.1
Cenizas	13.28	24.71
Azúcares totales	16.33	9.89
Humedad	7.98 ± 0.18	8.89 ± 0.2



#### 2.6.1.4. Nopal desde finales del siglo xx

Desde finales del siglo XX el Nopal (*Opuntia-ficus-indica*), comúnmente llamado Nopal, pertenece a la familia de cactáceas angiospermas dicotiledóneas, una familia que incluye alrededor de 1500 especies de cactus (Butera y col., 2002). *Opuntia-ficus-indica* es una planta tropical y subtropical, puede crecer en climas áridos y semiáridos con una distribución geográfica que abarca México, América Latina, Sudáfrica y países mediterráneos.

Cabe destacar que su composición rica en polifenoles, vitaminas, ácidos grasos poliinsaturados y aminoácidos se han destacado mediante el uso de una gran variedad de métodos de extracción. Además el Nopal *cactus* se emplea en la salud, nutrición, cosméticos en forma de té, mermelada, jugo, etc., se utiliza como un remedio herbal para diversos problemas de salud en diferentes países. Por otro lado, las poblaciones indígenas consumen cantidades sustanciales de frutas frescas o secas como alimento. Los compuestos y derivados de *cactus* naturales demostraron tener actividades biológicas relevantes que incluyen propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, polisacáridos de pectina y fibras.

El Nopal es una planta, que por sus características fisiológicas puede cultivarse a bajo costo; quizá por ello, las plantaciones comerciales de Nopal para producir fruta y verdura han aumentado considerablemente en los estados de Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco y Estado de México (Torres y col., 2015). El suelo es el medio natural para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y es la fuente de la mayoría de los nutrimentos necesarios para ello, los nutrimentos son requeridos en cantidades diferentes por las plantas, aquellos usados en mayores cantidades se denominan macronutrimentos, mientras que los usados en menores cantidades se conocen como micronutrientes.

#### 2.6.1.5. Composición Química del Nopal *Opuntia ficus - indica*

El conocimiento de la composición química del Nopal *Opuntia ficus- indica*, es fundamental para los objetivos de este trabajo, ya que la aptitud de su biomasa puede ser convertida en biogás (Valdez y col., 2010).

**Tabla 4.** Composición química del Nopal *Opuntia ficus indica* con base a 100 g de materia fresca y la fibra en peso seco.

Concepto	Contenido	Minerales		Compuestos funcionales	
Humedad	88 - 95	Fósforo	16	Niacina	0.30 - 0.46
Carbohidratos	3 – 7	Potasio	257	Ácido ascórbico	7 - 22
Cenizas	1 – 2	Calcio	93	Fitomenadiona	5.3
Proteínas	0.5 - 1.7	Magnesio	52	Carotenos totales	11.3 - 53.5
Lípidos	0.2	Hierro	1.6	Clorofila <sub>a+b</sub>	11.52
		Manganeso	0.5	<b>Fibras g / 100 g (peso seco)</b>	
		Cobre	0.1	Lignina	7 - 22
		Zinc	0.3	Celulosa	9 - 19
				Hemicelulosa	4 - 10

### 2.7. Pretratamiento

Algunas de las materias primas, cuentan con la presencia de compuestos de muy lenta degradación (como la lignina) que limita el acceso a materiales más fácilmente degradables. Esto conlleva a la motivación de 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 con vapor, tratamientos ácidos y alcalinos, empleo de microorganismos fibrolíticos) o más novedosos, como la utilización de microondas (Jackowiak y col., 2009) o ultrasonidos para desestabilizar estructuras o agregados (Apul y Sanin, 2010).

Se ha encontrado que el Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y Nopal (*Opuntia-ficus-indica*) son benéficas, y pueden significar un recurso para utilizarse como materia prima para la elaboración de biocombustible. Es por ello que es importante aplicarles un pretratamiento a los sustratos, para así conocer la biodisponibilidad de cada uno de ellos y poder aplicarlos en la obtención de biocombustible.

Para la comparación de estos pretratamientos existen diversos criterios que permiten evaluar su efectividad.

#### 2.7.1. Pretratamientos físicos o mecánicos

La finalidad de los pretratamientos mecánicos, está dirigida a reducir el tamaño de la materia por medio de diferentes tipos de molienda (molino de bolas, martillo, cuchillas, rodillos), para una mayor área de contacto y mejorar los procesos posteriores. Como resultado de este pretratamiento, permite hidrolizar o romper cadenas largas de biomoléculas que pueden ser (lípidos, material lignocelulósico, proteína, carbohidratos, etc.). Este efecto se lleva a cabo por medio de temperatura y presión, mediante el uso de agua y vapor (Inoue y col., 2008). Entre algunos de los pretratamientos físicos se encuentran: Explosión de vapor, agua líquida caliente, extrusión, irradiación y térmico el utilizado en el pretratamiento es:

- Térmicos

Son procesos donde la biomasa se expone a altas temperaturas. La efectividad de la hidrólisis térmica dependerá del tipo de biomasa y de la utilización de temperaturas sobre 190 °C, en este último caso se puede producir un efecto de disminución de biodegradabilidad por la posible formación de compuestos recalcitrantes a esas temperaturas. Investigaciones con pretratamientos térmicos de 170 °C durante 60 min, y extracción de fenoles,

han mencionado aumentos del rendimiento y producción de metano hasta 16.9 % y 6.9 % respectivamente, comparado con el control no tratado (Serrano y col., 2017).

### 2.7.2. Pretratamientos químicos

Este tipo de pretratamiento se basa en la utilización de sustancias químicas, como ácidos, bases y líquidos iónicos, para modificar las características físicas y químicas de la biomasa lignocelulósica. Pretratamientos utilizados:

- Alcalino

Es una técnica donde se utilizan bases como el NaOH,  $\text{Ca(OH)}_2$ , KOH, CaO. Para modificar la lignina, hemicelulosa y celulosa, ayudando a degradar la biomasa para los microorganismos y enzimas. Un tratamiento alcalino logra aumentar la porosidad y área superficial, produce alteración de la lignina, entre otros efectos (Zheng, 2014).

Es importante la aplicación de pretratamientos: mecánico, térmico y químico a los sustratos Lirio acuático y Nopal Opuntia para conocer su biodisponibilidad por medio de dos etapas hidrólisis y acidogénesis.

La investigación publicada en el año 2000 por Lindsey y Hirt plantea en los "Usos del Lirio acuático, un manual práctico para usos del Lirio acuático alrededor del mundo", en el cual se indica que no se debe ver al Lirio acuático solo como una hermosa maleza nociva o como una potencial fuente de biomasa, esto es que se buscaría obtener una ventaja a partir de él. Con la finalidad de generar conocimientos que coadyuven al establecimiento de procesos, mecanismos y tecnología para aprovechar al máximo el potencial de biomasa de esta planta.

Patel y col., (1993), describen como el Lirio acuático fue sometido a una serie de pretratamientos termoquímicos usándolo como sustrato. Los pretratamientos fueron llevados a cabo a diferentes temperaturas a 50, 100 y 121 °C (con vapor) para cada pH. Los valores de pH ensayados en este estudio fueron 1, 3, 5, 7, 9, 11 y 13. Los valores de pH se ajustaron adicionando la cantidad necesaria ya sea de ácido clorhídrico o hidróxido de sodio. Todos los pretratamientos tuvieron una duración de 1 hora. Después del pretratamiento, las muestras se filtraron y se neutralizaron a pH 7 y se introdujeron en el digester a 37 °C, con agitación intermitente en régimen semicontinuo. Los resultados indican que el pretratamiento seleccionado incrementa la solubilidad de la biomasa y mejora la productividad de biogás. Los mejores resultados se obtuvieron utilizando pH 11.0 y una temperatura de 121°C (Patel y col., 1993).

### 2.9. Planteamiento del problema

Las características orgánicas de los residuos de Lirio acuático y Nopal, limitan su biodegradabilidad para ser aprovechados como residuos en la producción de metano por el proceso anaerobio.

En el presente estudio se propuso dar pretratamientos mecánico térmico y químico para modificar las estructuras lignocelulósicas y favorecer la biodisponibilidad para su degradación.

### 2.9. Justificación

En México existen lugares importantes como El lago de Pátzcuaro que presentan la problemática de la presencia del Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) que es una plaga que causa un daño importante a los ecosistemas que ahí se desarrollan y a la población en general, y además que se expande rápidamente. El Nopal (*Opuntia-ficus-indica*) es considerado como un residuo en Michoacán es de diez mil 946 toneladas al año (Ríos, 2017) que no es aprovechado en su totalidad. Dichos materiales pueden ser utilizados para la generación de subproductos de interés con valor agregado, dadas sus características taxonómicas y fisicoquímicas no son fáciles de degradar por lo que para ser utilizados en la generación de biocombustibles es necesario aplicarles un pretratamiento: mecánico, térmico, químico o combinados, tanto al Lirio acuático como al Nopal para realizar la ruptura por hidrólisis de las macromoléculas y, utilizarlas como fuentes de energía para la disponibilidad ya que así lo requieren; por ejemplo los procesos anaerobios.

### 2.10. Hipótesis

La implementación de pretratamientos combinados; mecánico, térmico y químico sobre los sustratos Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y Nopal (*Opuntia-ficus-indica*), respectivamente, permitirá obtener un incremento en la biodisponibilidad que contribuirá en el desarrollo adecuado en la etapa de hidrólisis de los consorcios microbianos en los procesos anaerobios.

### 2.11. Objetivo general

Evaluar la biodisponibilidad del Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y Nopal (*Opuntia-ficus-indica*), respectivamente, mediante pretratamientos combinados: mecánico, térmico y químico.

### 2.11.1. Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente los sustratos de Lirio acuático y Nopal, respectivamente.
- Analizar los tiempos de enfriamiento para cada sustrato una vez aplicado el pretratamiento térmico.
- Evaluar la biodisponibilidad de los sustratos al finalizar los pretratamientos combinados, mediante los parámetros Demanda Química de Oxígeno Total ( $DQO_T$ ), Demanda Química de Oxígeno Soluble ( $DQO_S$ ) y Ácidos Grasos Volátiles (AGV's).

# CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

### 3.1. Lirio acuático

#### 3.1.1. Recolección

El proceso de recolección del Lirio acuático se llevó a cabo en zonas rivereñas del lago de Pátzcuaro, la cual se realizó de forma manual seleccionando de 5 a 7 ejemplares de forma aleatoria, sin considerar tamaño y edad de la planta.



**Figura 4.** Recolección de Lirio acuático

#### 3.1.2. Almacenamiento

El Lirio acuático se colocó en una bolsa plástica y se almacenó en un refrigerador marca Toro Rey, modelo VRD28 a 4 °C, para mantener sus propiedades iniciales.



**Figura 5.** Almacenamiento de Lirio acuático

### 3.1.3. Troceado

El Lirio acuático fue troceado a un tamaño de 0.5 cm desde raíz, tallo y hojas, para tener una mezcla homogénea y representativa de la planta.



**Figura 6.** Troceado de Lirio acuático

### 3.1.4. Pesaje

Una vez que el Lirio acuático fue troceado, se pesan 170 g en una balanza analítica marca OHAUS, modelo SPX621.



**Figura 7.** Peso a utilizar del Lirio acuático

### 3.1.5. Molienda

El proceso de molienda se realiza durante 5 minutos, introduciendo 170 gramos de Lirio acuático y 250 mL de agua en una licuadora marca Oster, modelo BEST 02-E01 y potencia de 600 W, con lo cual se obtiene un concentrado homogéneo con volumen de 470 mL.





**Foto 8.** Molienda de Lirio acuático

### 3.1.6. Caracterización del Lirio acuático

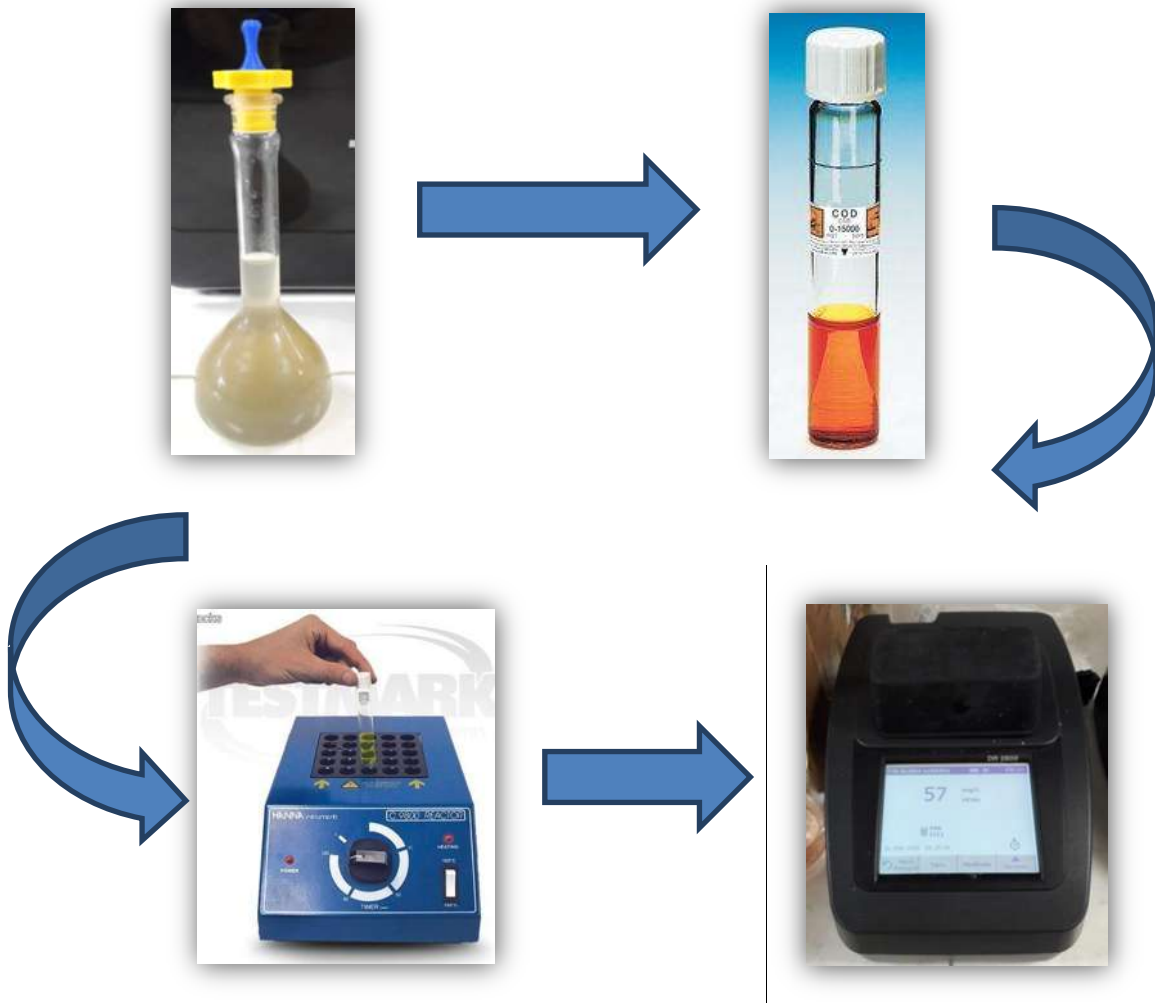
Al concentrado obtenido de la molienda se le realizaron las siguientes determinaciones: temperatura, pH y  $DQO_T$ .

La temperatura fue medida de acuerdo con la norma NMX-AA-007-SCFI-2000 con un termómetro de bulbo lleno de alcohol con escala de temperatura de -20 a 100 °C.

El pH fue medido de acuerdo con la norma NMX-AA-008-SCFI-2000 con un potenciómetro marca *Thermo Scientific*, modelo ORION.

La medición de la  $DQO_T$  se realizó con el método HACH, el cual es un método validado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, utilizando el siguiente procedimiento:

1. Se realizó una dilución 1:100; con una pipeta se toma 1 mL del concentrado totalmente homogéneo y posteriormente se colocan en un matraz para aforarlo con agua destilada.
2. Se colocaron 2 mL de la dilución preparada en el paso anterior, en un vial de DQO de rango de 100 a 15000 mg/L.



**Figura 9.** Metodología de la caracterización del concentrado de Lirio acuático

### 3.1.7. Dilución

Posterior al proceso de caracterización y con el fin de mantener el experimento con parámetros de control, se realizó dilución del concentrado homogéneo de Lirio acuático hasta una concentración final de 15,000 mg/L medida como  $DQO_T$ , por medio de la siguiente Ecuación.

$$X = \frac{N \times 500}{DOQT}$$

Donde:

X = cantidad de concentrado a utilizar (mL).

N = 15,000 mg/L, cantidad a la que se ajusta.

500 = Volumen del recipiente (mL).

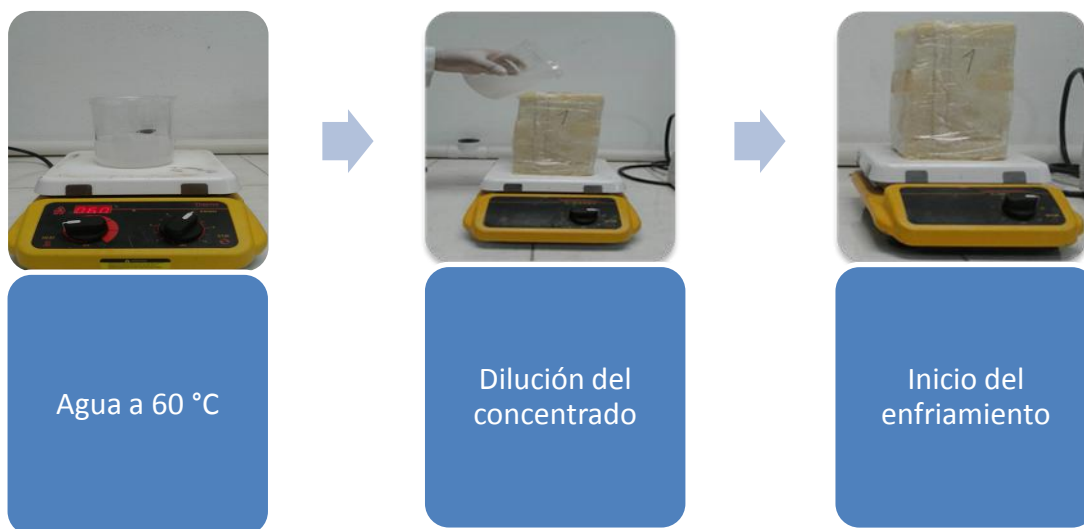
$DQO_T$  = Demanda Química de Oxígeno total del concentrado (mg/L).

### 3.1.8. Aplicación de pretratamiento

A las diluciones obtenidas del concentrado (pretratamiento mecánico) en el paso anterior, se les aplicaron los pretratamientos térmico y químico de forma individual y en combinación.

- Pretratamiento mecánico - térmico

Para este pretratamiento se calentó agua en una plancha térmica hasta alcanzar una temperatura de 60 °C, posteriormente el agua se vierte en el recipiente que contiene el concentrado.



**Figura 10.** Proceso para pretratamiento mecánico – térmico

- Pretratamiento combinado (mecánico – térmico – químico)

La combinación del pretratamiento combinado consistió en la adición del agente químico (CaO) al agua a 60 °C, para posteriormente la suspensión obtenida verterla sobre el concentrado.

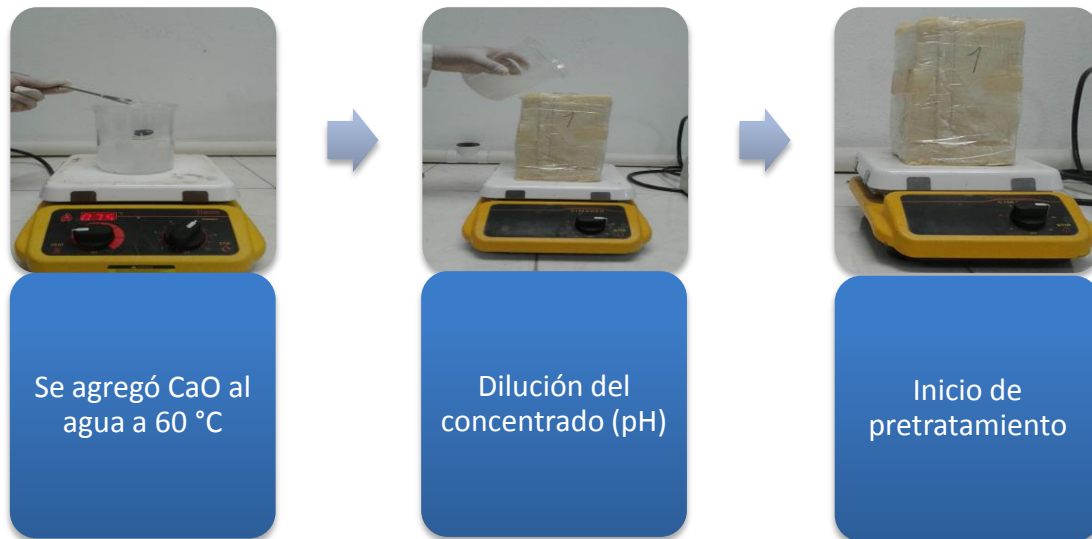


Figura 11. Proceso para pretratamiento mecánico – térmico – químico

### 3.1.9. Agitación

Para lograr una mezcla homogénea del concentrado de Lirio acuático y la adición de agua caliente y de la adición de agua caliente con CaO, se mantuvo en agitación constante la mezcla resultante durante todo el proceso de pretartamiento, con un agitador magnético marca *Fisherbrand* modelo 120.



Figura 12. Agitación del concentrado

### 3.1.10. Seguimiento del pretratamiento durante el tiempo de enfriamiento

El seguimiento de las modificaciones del sustrato en función del tiempo de enfriamiento del pretratamiento, se evaluaron los siguientes parámetros: Temperatura de enfriamiento,  $DQO_T$ ,  $DQO_S$  y AGV's, con y sin la presencia del CaO utilizado en el pretratamiento.

#### a) Análisis de los parámetros del pretratamiento

Los parámetros fueron analizados desde el tiempo 0 hasta 90 minutos se tomó 2 mL del concentrado, y se colocaron en un vaso, una vez terminado el pretratamiento se analizaron mediante los siguientes pasos:

1.- Preparación de diluciones de concentrado:

- Dilución 1:100

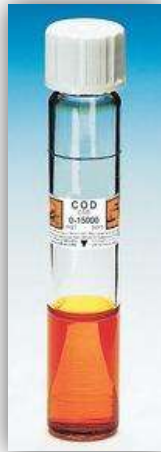
Utilizar agua destilada y un matraz de aforo, esta dilución se realizó en cada una de las pruebas a diferentes tiempos.



**Figura 13.** Dilución 1:100 del Lirio acuático

#### 2.- Análisis $DQO_T$ :

De la dilución 1:100 se tomó 2 mL del aforo y se adicionó al vial para conocer su demanda química de oxígeno, este análisis sólo se realizó en el tiempo 0 y al minuto 90.



**Figura 14.** Vial para  $DQO_T$

### 3.- Análisis $DQO_S$ :

La dilución 1:100 se filtró, con una bomba marca *SIEMENS* modelo EV-400. Después del filtrado se tomaron 2 mL y se vierten a un vial, este análisis se realizó para todos los tiempos.



**Figura 15.** Filtración de la dilución 1:100

### 4.- Análisis $AGV'_S$ :

Del concentrado se toman 0.5 ml y se aplicó el método 8196 HACH para la determinación de Ácidos Grasos Volátiles (ácido acético, propiónico, valérico, butírico, láctico).



**Figura 16.** Diluciones filtradas

### **3.2 Nopal *Opuntia ficus indica***

El Nopal utilizado fue proporcionado de una huerta de la región de Acutzio del canje, en esta región se encuentra el tipo de Nopal (*opuntia ficus*).

#### **3.2.1. Almacenamiento**

El Nopal se almacenaba en un recipiente de plástico a temperatura ambiente.



**Figura 17.** Almacenamiento de Nopal

#### **3.2.2. Troceado**

El Nopal *opuntia ficus* fue troceado aun tamaño de 0.2 cm para tener una mezcla homogénea y representativa de la planta.



**Figura 18.** Troceado de Nopal

### 3.2.3. Pesaje

Una vez que el Nopal *Opuntia ficus indica* fue troceado, se pesan 500 g en una balanza analítica marca OHAUS, modelo SPX621.



**Figura 19.** Peso del Nopal a utilizar

### 3.2.4. Molienda

El proceso de molienda se realizó durante 5 minutos, introduciendo 500 g de Nopal en una licuadora marca Oster, modelo BEST 02-E01 y potencia de 600 W, con lo cual se obtuvo un concentrado homogéneo.





**Figura 20.** Molienda del Nopal

### 3.2.5. Caracterización

Al concentrado obtenido de la molienda se le realizaron las siguientes determinaciones: temperatura, pH y DQOT.

La temperatura fue medida de acuerdo con la norma NMX-AA-007-SCFI-2000 con un termómetro de bulbo lleno de alcohol con escala de temperatura en grados centígrados desde -20 a 100 cada 10 grados.

El pH fue medido de acuerdo con la norma NMX-AA-008-SCFI-2000 con un Potenciómetro marca Thermo Scientific, modelo ORION.

La medición de la  $DQO_T$  se realizó con el método HACH, el cual es un método validado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, utilizando el siguiente procedimiento:

1. Se realizó una dilución 1:100; con una pipeta se toma 1 mL del concentrado totalmente homogéneo y posteriormente se colocan en un matraz para aforarlo con agua destilada.
2. Se colocaron 2 mL de la dilución preparada en el paso anterior, en un vial de DQO de rango de 100 a 15000 mg/L.

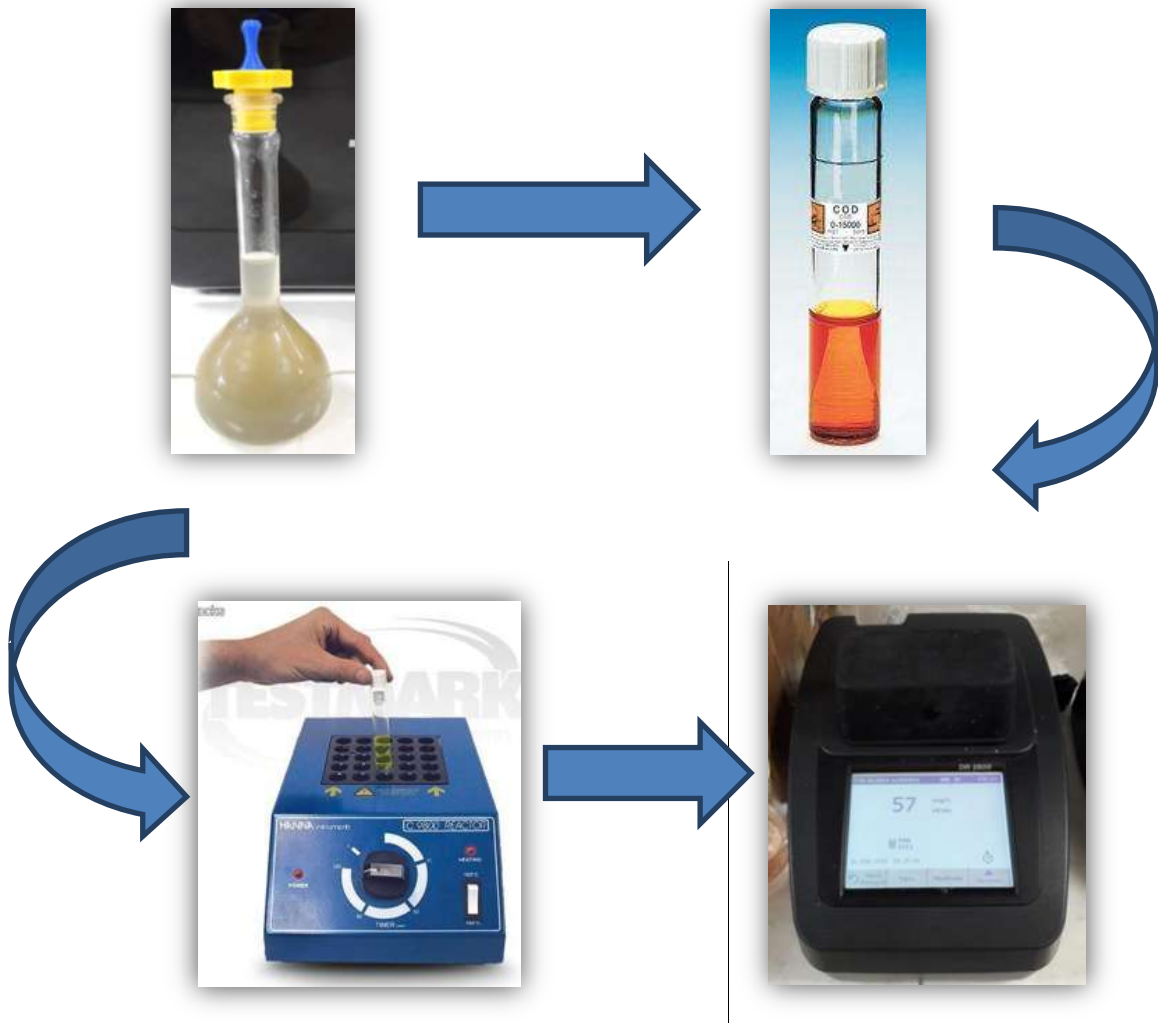


Figura 21. Metodología de la caracterización del concentrado del Nopal

### 3.2.6. Dilución

Posterior al proceso de caracterización y con el fin de mantener el experimento con parámetros de control, se realizó dilución del concentrado homogéneo del Nopal hasta una concentración final de 15,000 mg/L medida como  $DQO_T$ , por medio de la siguiente Ecuación.

$$X = \frac{N \times 500}{DOQT}$$

Donde:

X = cantidad de concentrado a utilizar (mL).

N = 15,000 mg/L, cantidad a la que se ajusta.

500= Volumen del recipiente (mL).

DQO<sub>T</sub>= Demanda Química de Oxígeno total del concentrado (mg/L).

### 3.2.7. Aplicación de Pretratamiento

A las diluciones obtenidas en el paso anterior se le aplicaron los pretratamientos térmico y químico, de forma individual y en combinación.

- Tratamiento mecánico - térmico

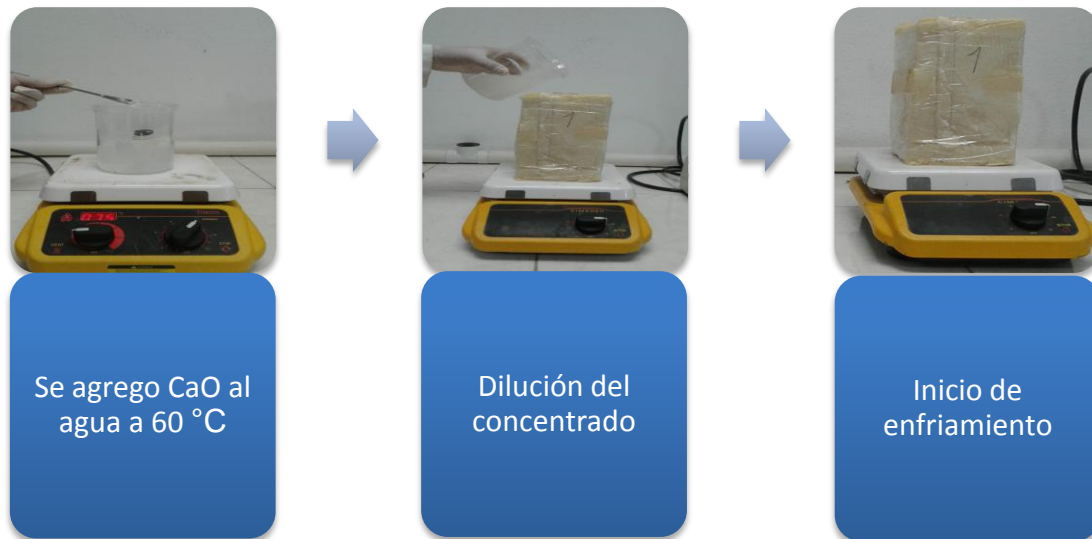
Para este pretratamiento se calienta agua en una plancha térmica hasta alcanzar una temperatura de 60 °C, posteriormente el agua se vierte al recipiente que ya contiene concentrado.



**Figura 22.** Proceso para pretratamiento mecánico – térmico

- Tratamiento combinado ( mecánico – térmico – químico)

La combinación del pretratamiento combinado consistió en la adición del agente químico (CaO) al agua a 60 °C, para posteriormente la suspensión obtenida verterla sobre el concentrado.



**Figura 23.** Proceso para pretratamiento mecánico – térmico – químico

### 3.2.8. Agitación

Para lograr una mezcla homogénea del concentrado de Nopal y la adición de agua caliente y de la adición de agua caliente con CaO, se mantuvo en agitación la mezcla resultante durante todo el proceso de pretartamiento, con un agitador magnético marca *Fisherbrand* modelo 120.



**Figura 24.** Agitación del concentrado

### 3.2.9. Seguimiento del pretratamiento durante el tiempo de enfriamiento

El seguimiento de las modificaciones del sustrato en función del tiempo de enfriamiento del pretratamiento, se evaluaron los siguientes parámetros: Temperatura de enfriamiento, DQO<sub>T</sub>, DQO<sub>S</sub> y AGV's, con y sin la presencia del agente químico utilizado en el pretratamiento.

### b) Análisis de los parámetros del pretratamiento

Los parámetros fueron analizados desde el tiempo 0 hasta 140 minutos se tomó 2 mL del concentrado, y se colocaron en un vaso, una vez terminado el pretratamiento se analizaron mediante los siguientes pasos:

#### 1. Preparación de diluciones de concentrado:

- Dilución 1:100

Utilizar agua destilada y un matraz de aforo, esta dilución se realizó en cada una de las pruebas a diferentes tiempos.



**Figura 25.** Dilución 1:100 Nopal

#### 2.- Análisis DQO<sub>T</sub>:

Con la dilución 1:100 se tomó 2 mL del aforo y se vertió al vial para conocer su demanda química de oxígeno, este análisis solo se realizó en el tiempo 0 y 90 minutos.



Figura 26. Vial para  $DQO_T$

### 3.- Análisis $DQO_S$ :

La dilución 1:100 se filtró, con una bomba marca *SIEMENS* modelo EV-400. Después del filtrado se tomaron 2 mL y se vierten a un vial, este análisis se realiza para todos los tiempos.



Figura 27. Filtración de la dilución 1:100

### 4.- Análisis $AGV'_S$ :

Del concentrado se toman 0.5 mL y se aplicó el método 8196 HACH para la determinación de Ácidos Grasos Volátiles (ácido acético, propiónico, valérico, butírico, láctico).



**Figura 28.** Diluciones filtradas

## CAPÍTULO 4

# ANÁLISIS Y DISCUSIÓN RESULTADOS



Se realizó el pretratamiento: mecánico, térmico y químico para evaluar la variabilidad de la biodisponibilidad de nutrientes en los sustratos Lirio acuático y Nopal *Opuntia ficus indica*.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados:

### 4.1. Pretratamiento mecánico - térmico Lirio acuático y Nopal

El valor de los concentrados de la  $DQO_T$  para Lirio acuático fue de 34,800 mg/L, mientras que para el Nopal fue 53,225 mg/L, en ambos casos se ajustó la concentración de trabajo a un valor de 15,000 mg/L; con respecto de la temperatura en ambos casos se tuvo 22°C, para el Lirio se adicionaron 285 ml de agua a 60°C, generando una temperatura de mezcla de 42°C, para el Nopal se adicionaron 360 ml de agua caliente para dar una temperatura de mezcla de 47°C; El valor de pH de los concentrados de Lirio acuático y Nopal es de 6.9 y 4.8 respectivamente.

#### 4.1.1. Resultado del tiempo de enfriamiento

Dado que la temperatura de mezcla del pretartamiento para Nopal y Lirio acuático fueron diferentes (figuras 29 (a),(b)), el tiempo final para alcanzar la temperatura de 35 °C, fue de 90 minutos para Lirio, mientras que para Nopal fue de 140 minutos, por lo que como consecuencia da una diferencia en el tiempo de pretartamiento de 50 minutos. Con respecto al enfriamiento en ambos caso se observó un comportamiento de tipo lineal con prácticamente el mismo valor de pendiente (-0.0774 para Lirio acuático, -0.0789 para Nopal).

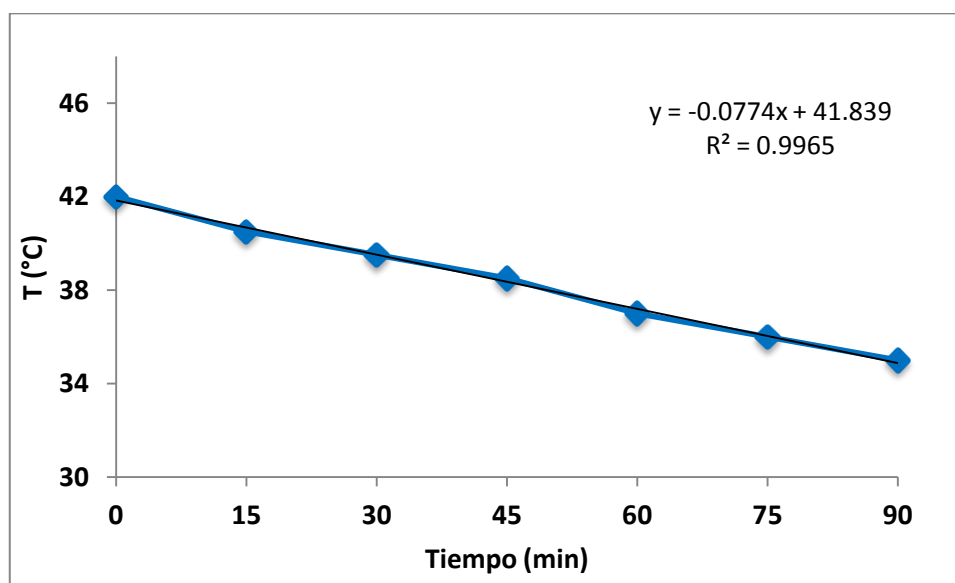


Figura 29 (a). Enfriamiento del Lirio acuático

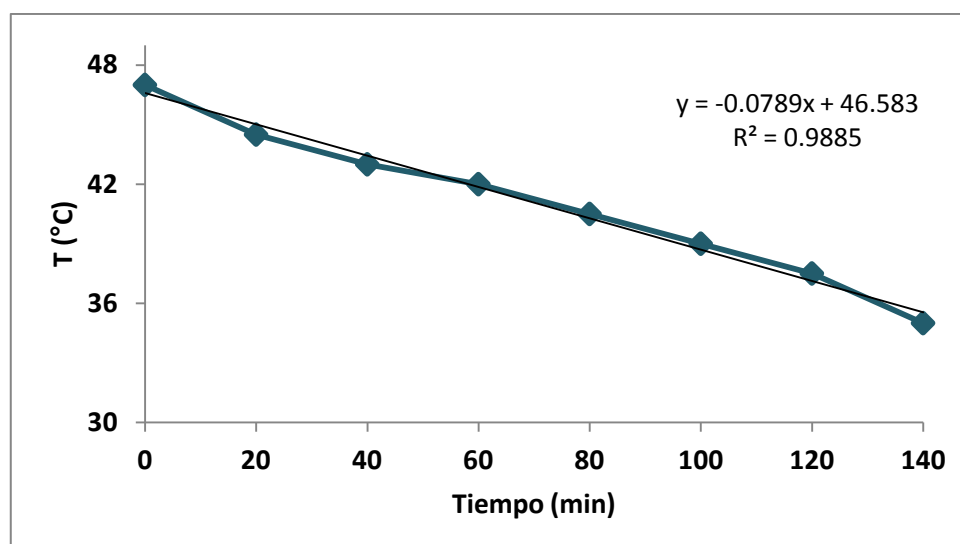


Figura 29 (b). Enfriamiento del Nopal

#### 4.1.2. DQO<sub>T</sub> al Inicio y final del pretratamiento

La demanda química de óxido (DQO<sub>T</sub>) se analizó al inicio y al final del pretratamiento (tabla 5), esto con el fin de observar si por efecto de la temperatura se observaba descomposición de la materia orgánica. Los resultados obtenidos indican que para el Lirio acuático no hubo cambio alguno ya que ambos valores permanecen iguales a 15,500; con respecto al Nopal se observa una pérdida de materia orgánica ya que la DQO disminuye de 15,400 a 15,100

Tabla 5. DQO<sub>T</sub> inicio y final

Concentrado	Inicio	Final
Lirio	15,500	15,500
Nopal	15,400	15,100

#### 4.1.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO<sub>S</sub>)

Los resultados de la DQOs para el Lirio acuático y Nopal de acuerdo con las figuras 30 (a) y 30 (b), presentan una tendencia con un ligero incremento de forma global ya que para el Lirio acuático se tuvo un valor inicial de 5,150 mg/L y de 6,225 mg/L a los 90 minutos mientras que para Nopal el inicial fue 9,875 mg/L y de 10,950 mg/L a 120 minutos; éste cambio en lo global, es atribuible a que una cantidad de sustancias llegan a transformarse y/o solubilizarse por efecto del pretratamiento térmico. En ambos casos las variaciones que se presentan en los valores de la DQOs con respecto al tiempo de pretratamiento pueden ser atribuibles a errores experimentales. Además, se observa que la DQOs del Nopal es mayor que la DQOs del Lirio acuático, por lo que se infiere que el Nopal tiene un mayor potencial para ser utilizado en la producción de biogás, por contar en su estructura con el polisacárido denominado mucilago.

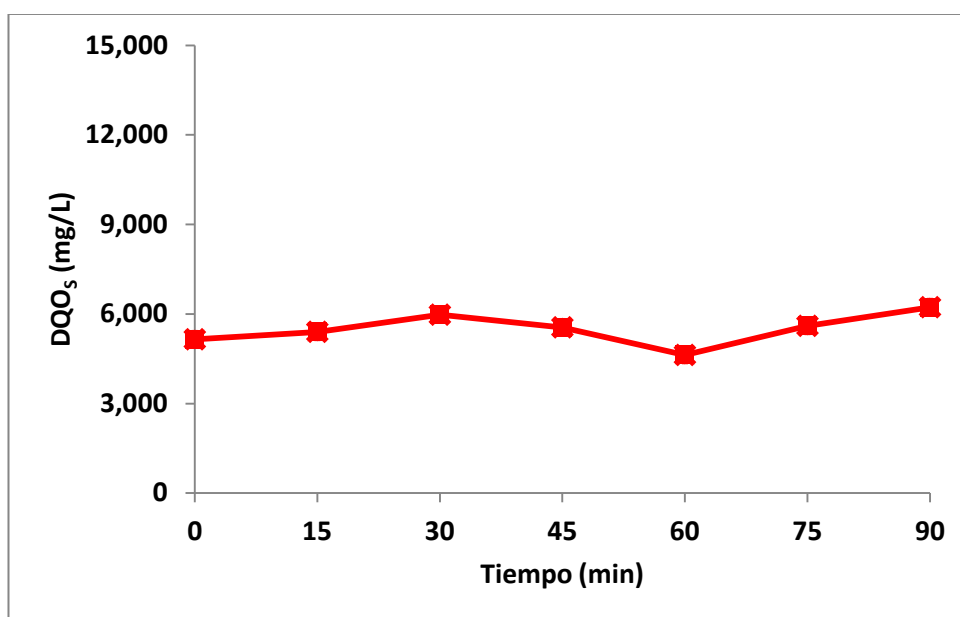


Figura 30 (a). Incremento DQO<sub>5</sub> del Lirio acuático

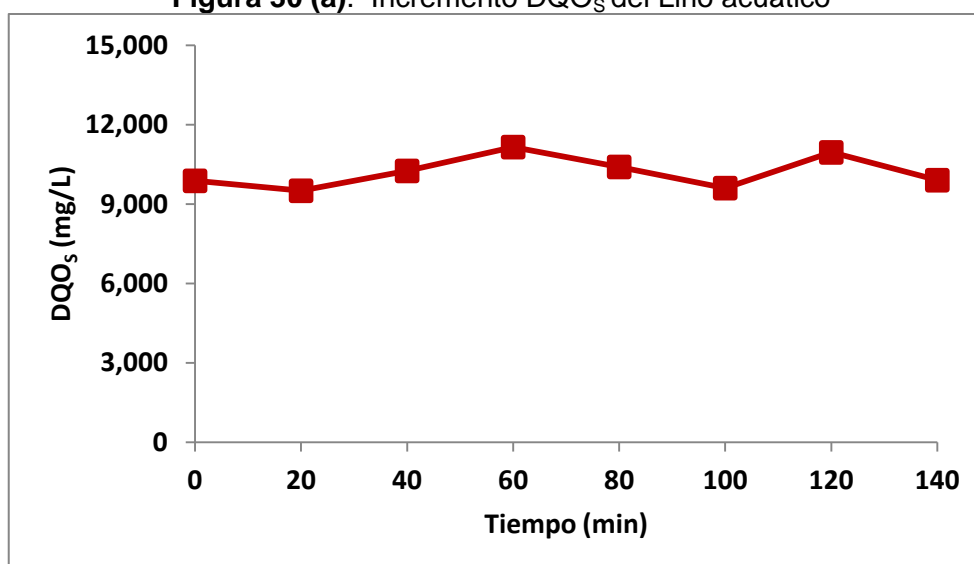


Figura 30 (b). Incremento DQO<sub>5</sub> del Nopal

#### 4.1.4. Ácidos Grasos Volátiles (AGV's)

Los Ácidos Grasos Volátiles, son una fracción de la materia orgánica presente como DQOs, y son precursores de los acetatos necesarios para que las bacterias metanogénicas los transformen en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Los resultados de los AGV's para el Lirio acuático y Nopal [figuras 31(a) y 31(b)], presentan una tendencia a con un ligero incremento de forma global ya que para el Lirio acuático se tuvo un valor inicial de 1,934 mg/L y de 2,026 mg/L a los 90 minutos mientras que para Nopal el inicial fue 1,431 mg/L y de 1,716 mg/L a 140 minutos; estos incrementos en los AGV's, son atribuibles a que la temperatura provocó las transformaciones de diversas sustancias en ácido acético, ácido propiónico, ácido valérico. Con respecto a la comparación de los

## Capítulo 4. Análisis y Discusión de Resultados

AGV's entre el Lirio y el Nopal, se observa que el Lirio acuático presenta una mayor cantidad con respecto al Nopal, contrario al efecto observado en la variable DQOs; condición que hace inferir que, si bien en el Nopal tiene mayor cantidad de materia soluble que el Lirio acuático, el Lirio acuático tiene mayor cantidad de AGV's que el Nopal. En ambos casos se presentan variaciones en las tendencias reportadas los cuáles son atribuibles a errores experimentales.

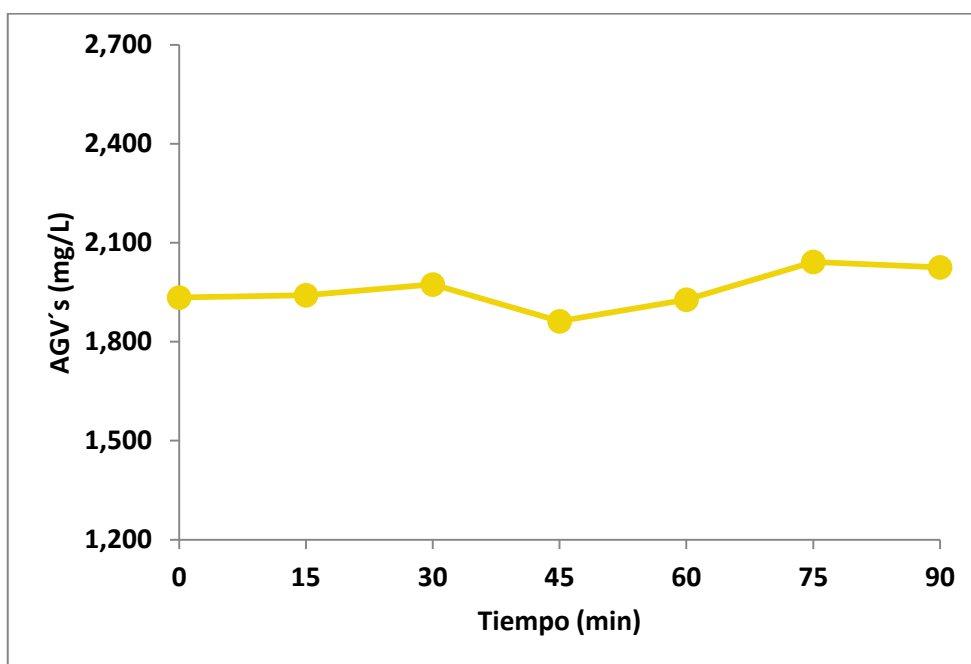


Figura 31(a). Formación de AGV's del Lirio acuático respecto al tiempo

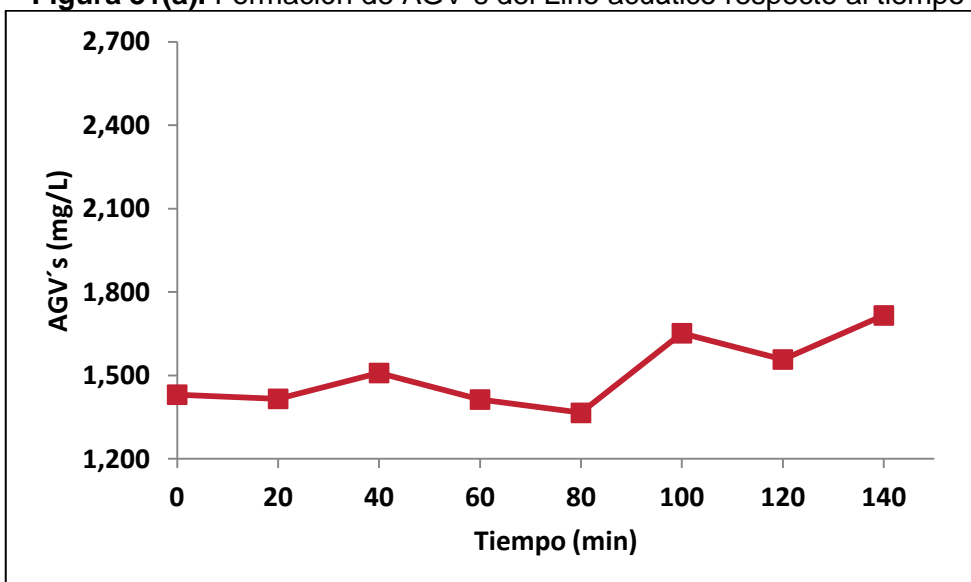


Figura 31(b). Formación de AGV's del Nopal respecto al tiempo

### 4.2. Pretratamiento mecánico – térmico – químico de Lirio acuático y Nopal

El valor de los concentrados de la  $DQO_T$  para Lirio acuático fue de 34,000 mg/L, mientras que para el Nopal fue 45,900 mg/L, en ambos casos se ajustó la concentración de trabajo a un valor de 15,000 mg/L; con respecto de la temperatura en ambos casos se tuvo 22°C, para el Lirio acuático se adicionaron 280 mL de una mezcla agua con CaO a 60°C, generando una temperatura de mezcla de 42°C y pH de 8, para el Nopal se adicionaron 336 mL de la mezcla de agua con CaO a 60 °C, para dar una temperatura de mezcla de 47 °C y pH de 6. La adición del CaO en el tratamiento térmico, provocó que el pH se incrementara en ambos sustratos (8 y 6 para Lirio acuático y Nopal respectivamente) con respecto a los valores que se obtuvieron solamente con el tratamiento térmico (6.9 y 4.8 para Lirio acuático y Nopal, respectivamente).

#### 4.2.1. Resultado de tiempo de enfriamiento

Debido a que la temperatura de mezcla del pretratamiento para Nopal y Lirio acuático fueron diferentes [figuras 32(a) y 32(b)], el tiempo final para alcanzar la temperatura de 35 °C, fue de 90 minutos para Lirio acuático y de 140 minutos para Nopal. Esta diferencia en el tiempo de enfriamiento de 50 minutos, es atribuible al diferencial de temperatura inicial de las mezclas, ya que en ambos casos se presentó la misma tendencia lineal de decremento en la temperatura, con prácticamente el mismo valor en la pendiente (-0.0738 para Lirio acuático, -0.0824 para Nopal). La adición de CaO no modificó la velocidad de enfriamiento en el pretratamiento.

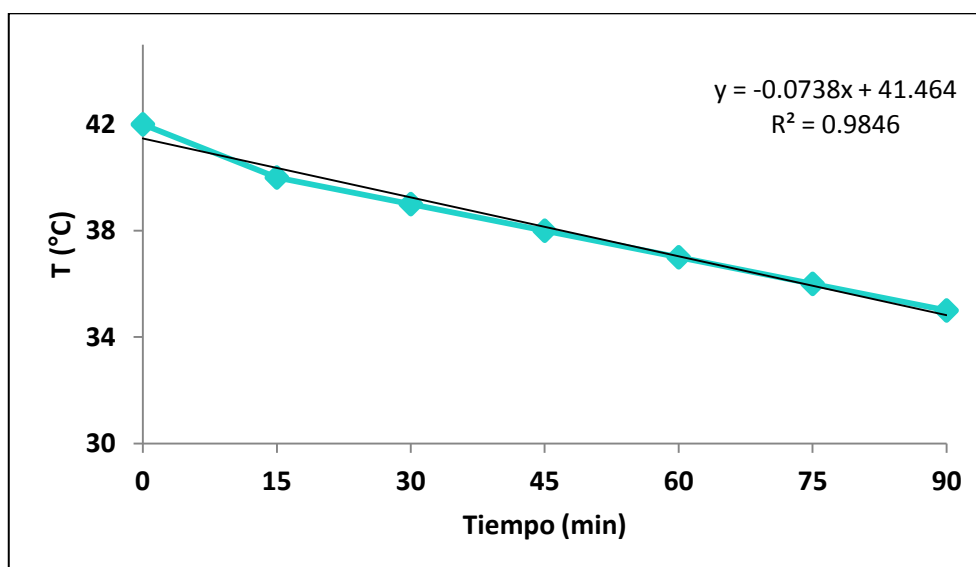


Figura 32(a). Enfriamiento térmico-químico del Lirio acuático

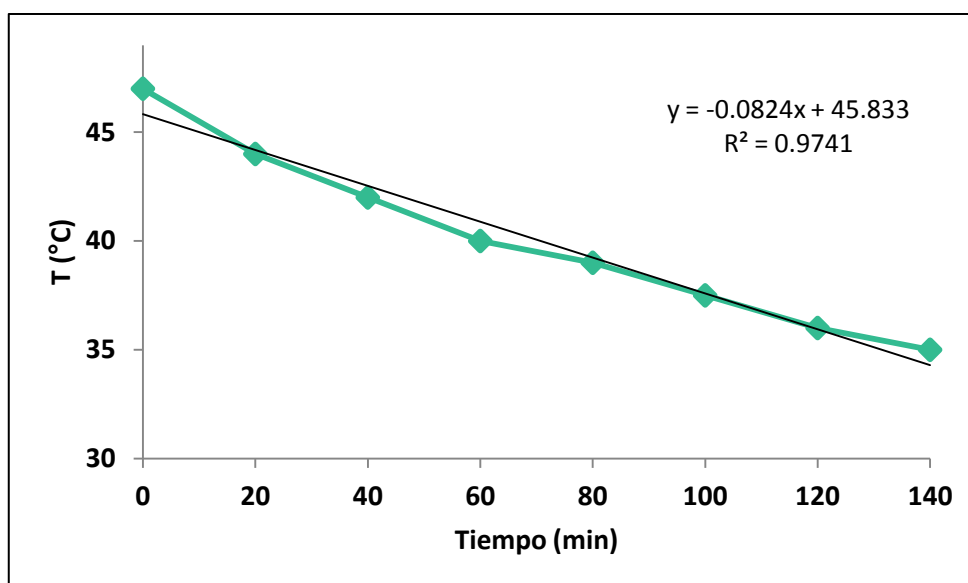


Figura 32(b). Enfriamiento térmico-químico del Nopal

### 4.2.2. Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQO<sub>s</sub>)

Los resultados de la DQOs para el Lirio acuático y Nopal [figura 33(a) y 33(b)], presentan diferente tendencia de forma global, para el Lirio acuático se observa un ligero decremento con un valor inicial de 6,300 mg/L y de 5,325 mg/L a los 90 minutos mientras que para Nopal se presenta un ligero incremento con un valor inicial fue 9,350 mg/L y de 10,450 mg/L a 120 minutos. En lo que respecta a la tendencia de disminución de la DQOs del Lirio acuático, ésta puede ser debida a que, al reaccionar las sustancias solubles con el CaO, pierden solubilidad; sin embargo, la formación del acetato correspondiente influye positivamente para la etapa de metanización. Para el Nopal, se presenta una tendencia ligera de incremento, lo cual se atribuye a ruptura de material fibroso a material soluble; sin embargo, el nivel de la DQOs es menor que cuando se tiene solamente el tratamiento térmico.

Además, se observa que la DQOs del Nopal es mayor que la DQOs del Lirio acuático, por lo que se infiere que el Nopal tiene un mayor potencial para ser utilizado en la producción de biogás, por contar en su estructura con el polisacárido denominado mucilago.

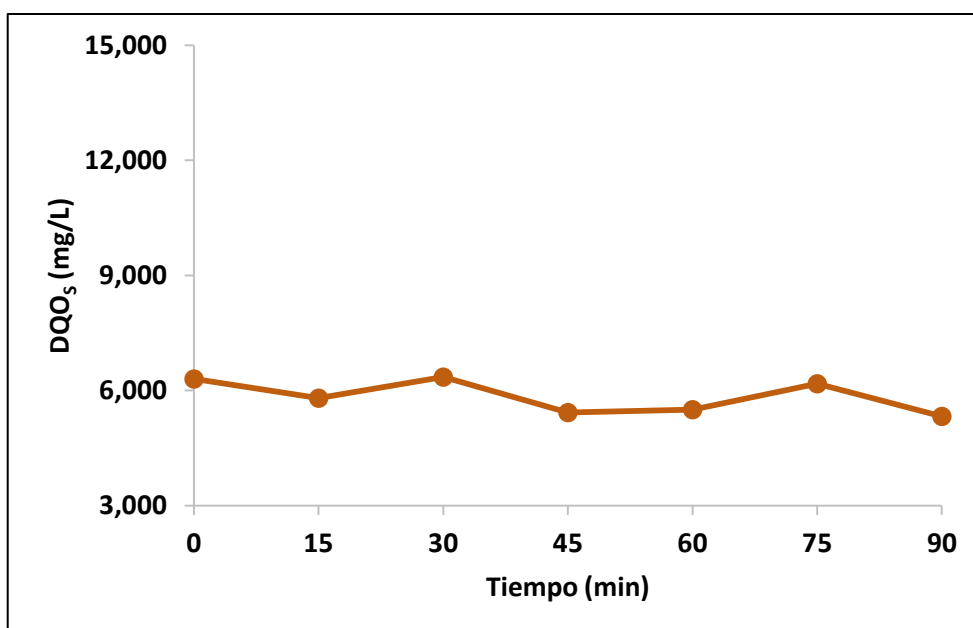


Figura 33(a). DQO<sub>5</sub> del Lirio acuático respecto al tiempo

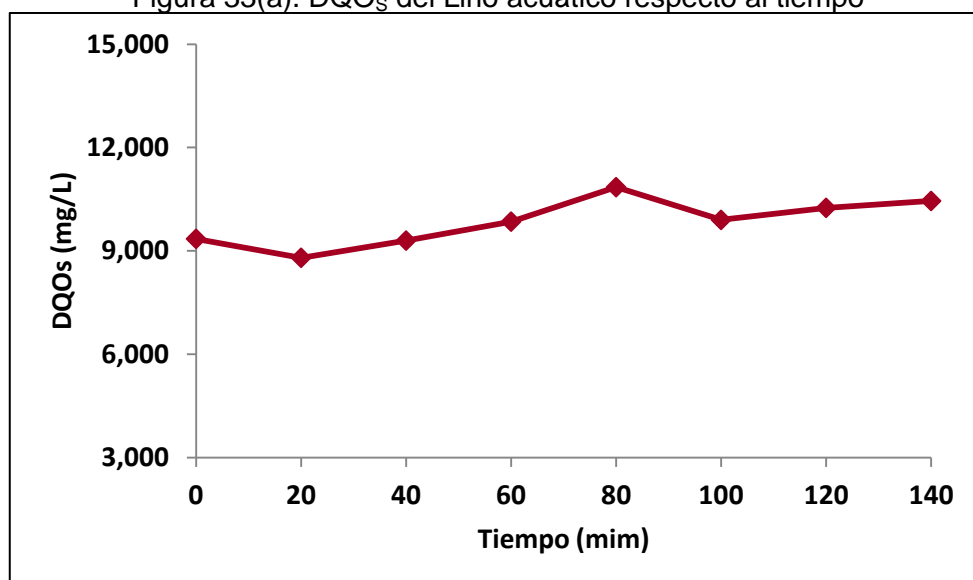


Figura 33(b). DQO<sub>5</sub> del Nopal respecto al tiempo

#### 4.2.3. Ácidos Grasos Volátiles (AGV's)

Los resultados de los AGV's para el Lirio acuático (figura 34) presentan diferentes comportamientos: Para el Lirio acuático se presentó un ligero incremento de forma global ya que tuvo un valor inicial de 2,117 mg/L y de 2,260 mg/L a los 90 minutos, comparando estos resultados con el pretratamiento térmico únicamente, se observa que la adición de CaO promueve la formación de AGV's, lo cual puede ser atribuido a la ruptura de moléculas poliméricas; para Nopal se presentó el consumo total de los AGV's por efecto de neutralización debido a la adición de la CaO.

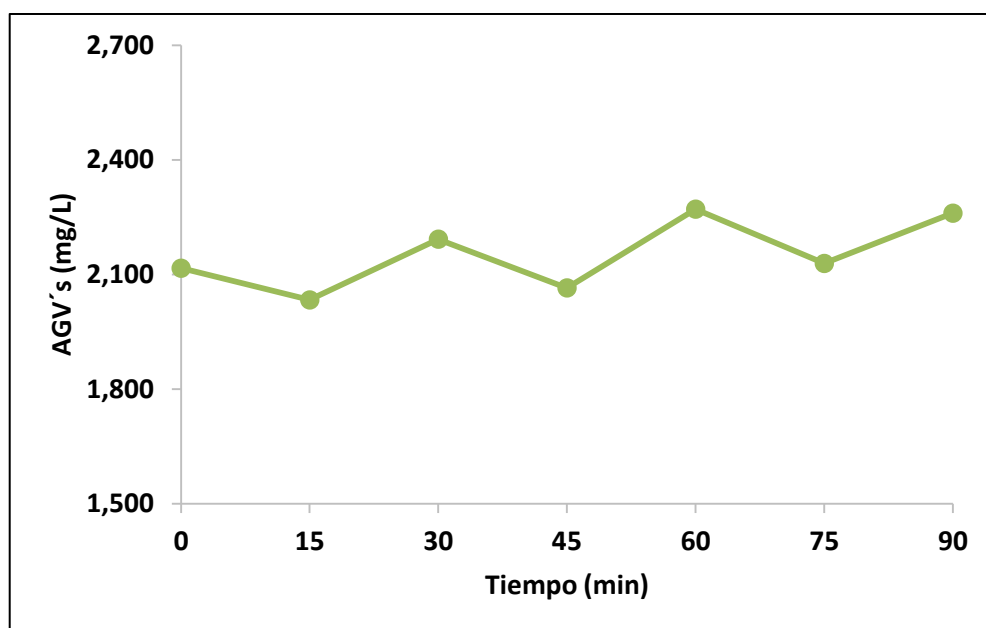


Figura 34. AGV's del Lirio acuático respecto al tiempo

En la figura 35 se muestra la comparación de los DQOs y AGV's sin CaO y con CaO. Se encontró que cuando DQOs disminuyen y se presenta un incremento de AGV's debido a la degradación de la materia orgánica convirtiéndose a ácidos, y cuando DQOs se incrementa los AGV's disminuyen, la materia orgánica está oxidando sus componentes y no hay una gran formación de AGV's. En el tiempo de 60 minutos se observó que tanto con CaO y sin CaO la DQOs disminuye y tienden a aumentar los AGV's, y a los 90 minutos la DQOs sin CaO aumenta pero los AGV's disminuyen y con CaO es el caso contrario decremento de la DQOs y un aumento de AGV's, esto nos indica que posiblemente cuando la DQOs aumenta se está hidrolizando la materia orgánica.

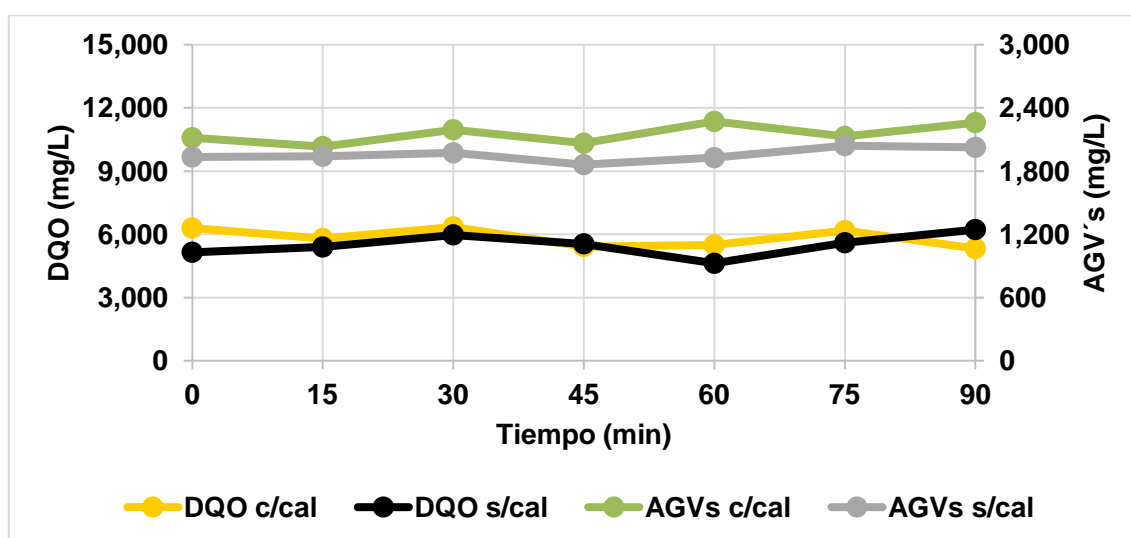


Figura 35. Comparación de DQOs y AGV's del Lirio acuático respecto al tiempo



# CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones

La aplicación de pretratamientos sobre los sustratos Lirio acuático y Nopal, permite incrementar su biodisponibilidad, ya que aumenta la cantidad de sustancias solubles medidas como Demanda Química de Oxígeno soluble y la cantidad de Ácidos Grasos Volátiles.

Como resultado del pretratamiento mecánico – térmico, el Nopal presentó mayor cantidad de sustancias solubles que el Lirio acuático; sin embargo, con respecto a los Ácidos Grasos Volátiles, el Lirio acuático presentó mayor cantidad que el Nopal.

De los pretratamientos simultáneos mecánico – térmico – químico, se observó que para el Lirio acuático y Nopal hubo disminución de las sustancias solubles con respecto solamente al tratamiento mecánico – térmico. En lo que respecta a los ácidos grasos volátiles, estos se incrementan para el Lirio acuático, mientras que desaparecen completamente para el Nopal.

# CAPÍTULO 6

# BIBLIOGRAFÍA

### 6.1 BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, B. (2007). Análisis de factibilidad del cultivo de la tuna en la Localidad de Icaño, Dirección provincial de programación del desarrollo, Argentina. Departamento La Paz. pág: 6-8.
- Aguirre M. Antonio, (2017). Reproducción del Lirio acuático. Web: <http://www.respuesta.com.mx/index.php/30-noticias-principales/56322-reproduccion-del-lirio-acuatico-pesadilla-para-pescadores-del-lago-de-patzcuaro.html>
- Apul, O. G. y Sanin, (2010). Ultrasonic pretreatment and subsequent anaerobic digestión under different operational conditions. *Bioresource Technology* 101(23), 8984-8992.
- Butera, D., Tesoriere L., Gaudio F., Bongiorno, A., Allegra, M. Pintaudi A. M., Kohen R., Livrea M.A. (2002). Actividades antioxidantes de los extractos de fruta de la pera espinosa siciliana (*Opuntia ficus indica*) y de las propiedades reductoras de sus betalainas: betanina e indicaxantina. *J. Agric. Food Chem.* 50, 6895–6901.
- Cervi R. G., Esperancini M. S. T. y Bueno O. C. (2011). Viabilidad económica de la utilización de biogás para la conversión en energía eléctrica. *Información Tecnológica*: (22), 4, 3-14.
- Cornoa L., Pilub R., Adania F. Arundo donax L. (2014). A non-food crop for bioenergy and bio-compound production. *Biotechnology Advances*, (32), 8, 1535-1549 doi: 10.1016/j.biotechadv.2014.10.006.
- García-Ubaque C. A., Vaca-Bohórquez M. L. y Talero G. F. (2013). Aprovechamiento de biomasa peletizada en el sector ladrillero en Bogotá-Colombia: Análisis energético y ambiental. *Información Tecnológica*: (24), 3, 115-120.
- Gerardi H. M. (2003). *The Microbiology of anaerobic Digesters*. United States of America.
- Gómez Durán Thelma. (Junio 8 del 2015). Revista Lirio acuático, más que una plaga. Web: <https://tecreview.tec.mx/lirio-acuatico-mas-que-una-plaga/>
- Gómez E. A., Ríos L. y Peña J. D. (2012). “Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia”.
- Heike Vibrans. (2009). Revista Malezas de México. Web: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/pontederiaceae/eichhornia-crassipes/fichas/ficha.htm>.

- Inoue H., Yano S., Endo T., Sakaki T., Sawayama S. (2008). Combining hotcompressed water and ball milling pretreatments to improve the efficiency of the enzymatic hydrolysis of *eucalyptus*. *Biotechnol. Biofuels*. 1(2), 1-9 doi: 10.1186/1754-6834-1-2.
- Jackowiak D., Ribero T., Nonus M. y A. Pauss (2009). Effect of chemical, thermal, and microwave pretreatments on several agro-industry wastes and anaerobic digestion. En: J. Schmind H. P. Grimm P. Helm A. Grassi (Ed.). The 17th European Biomass Conference & Exhibition. (29 Junio - 3 Julio 2009). Hamburgo (Alemania) ISBN: 9788889407578.
- Juárez Luna Gregorio Nicolás (2011). Cambios en la composición del Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) debidos a su grado de madurez y a su transformación biotecnológica. Instituto Politécnico Nacional Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, México.
- Lindsey K. y Hirt H. M. (2000). Usos del Lirio acuático. Un manual práctico para usos del Lirio acuático alrededor del mundo. Anamed International. pp 2 – 4, 5 – 8, 21 – 30 y 31 – 32.
- Manzonea M., Berganteb S., Facciottob G. (2015). Energy and economic sustainability of woodchip production by black locust *Robinia pseudoacacia* L. *Revista*
- Martínez Centelles Vicente (2012). Características del Nopal. web: <https://www.botanical-online.com/botanica/chumbera-Nopal-opuntia-ficus-indica-caracteristicas>
- Mata A. J. (2003). Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Primera edición. IWA Publishing. Cornwall, Reino Unido. 322.
- Metcalf y Eddy. (2003). Wastewater engineering treatment and reuse. Cuarta edición. McGraw Hill. New York.
- Mondragón Jacobo S y Pérez Gonzales. (2003). Obtenido de El Nopal (*Opuntia ficus indica*) como forraje (pp. 17-25). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO).
- Morero B. y Campanella E. A. (2013). Simulación del proceso de absorción química con soluciones de aminas para la purificación biogás. *Información Tecnológica*: (24), 1,25-32.
- Nobel, P. (2003). *Ecofisiología de Opuntia ficus indica*. Universidad Nacional de Salta, Cátedra de Horticultura. Av. Bolivia 5150 (4400) Salta.
- Pascual A., Ruiz B. y Gómez P. (2011). Situación y potencial de generación de biogás. Estudio técnico, IDAE, Madrid

- Patel V., Desai M. y Madamwar D. (1993). Thermochemical pretreatment of water hyacinth for improved biomethanation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 42, 67 – 74
- Pensemosverdemx (2018). La plaga del Lirio acuático, manglar medio ambiente, web: <https://pensemosverde.com/2018/01/26/la-plaga-del-Lirio-acuatico/>
- Ramalho R. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Reverté, pp. 503-521.
- Ramírez Herrejón Juan Pablo, Omar Domínguez Domínguez. (2012). Revista El Lago de Pátzcuaro, un lago en decadencia.
- Ríos Velázquez Maricruz. (2017). Michoacán es el sexto estado líder en producción de Nopal. Web: <http://www.cambiodemiochacan.com.mx/nota-n28517>
- Saenz, C. H. (2006). Utilización agroindustrial del Nopal. Obtenido de Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO N° 162. Roma
- Salazar, F., Cavazos J. y Martínez J. L. (2012). Metodología basada en el modelo de referencia para cadenas de suministro para analizar el proceso de producción de biodiesel a partir de higuerilla. *Información Tecnológica*: (23), 1.
- Sánchez Ó. y Cardona C. (2008). Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*: (99), 5270-5295.
- Scheinvar, L. (1999). Taxonomía de las Opuntias utilizadas. *Agroecología, cultivo y usos del Nopal*. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal N° 132. Pp. 21-28
- Serrano A. F. F.G.B. (2017). Olive mill solid waste biorefinery: High-temperature thermal pre-treatment for phenol recovery and biomethanization. *Journal of Cleaner Production*, 148, 314-323.
- Serrano A. F.-G.-B. (2017). Biomethanization of olive mill solid waste after phenols recovery through low-temperature thermal pre-treatment. *Waste Management*, 61, 229- 235.
- Sudzuki, F. (1999). Anatomía y Morfología. *Agroecología, cultivos y usos del Nopal*. Roma: Barbera (págs. 29-36).
- Souza J. y Schaeffer L. (2013). Sistema de compresión de biogás y biometano, *Información Tecnológica*: (24), 6.

- Torres Ponce<sup>1</sup>Reyna Lizeth, Dayanira Morales Corral<sup>1</sup>, María de Lourdes Ballinas Casarrubias<sup>1</sup> y Guadalupe Virginia Nevárez Moorillón. (2015). El Nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* vol.6 no.5 Texcoco.
- Uzun I. (1996). Fruit and cladodes isosymes in cactus pear. *Acta Hort.* 438: 53-55
- Van der Stelt M. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review, *Biomass and Bioenergy*. *Información Tecnológica:* (35), 3748-3762.
- Valdez Cepeda Ricardo David y Fidel Blanco Macías; Rafael Magallanes-Quintanar; Rigoberto E. Vázquez Alvarado; Manuel Reveles Hernández. (2010). Avances en la nutrición del Nopal en México; *Revista Salud Pública y Nutrición, Edición Especial No. 5*
- Vargas Soto José Lorenzo. (2007). Utilizan tecnología para aprovechar el Lirio acuático en lugar de eliminarlo. *Empresa Tecnología Especializada en el Medio Ambiente (TEMA)*.
- Winkler M. A., (2008). *Tratamiento de aguas de desecho*, Editorial Limusa. México, DF.
- Zheng Y. Z. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35-53.