

# El Nopal

Ecofisiología del Nopal en México



Ernesto González Gaona  
Leandris Argentel Martínez  
Lucila Perales Aguilar  
Ofelda Peñuelas Rubio  
Alberto Margarito García Munguía  
Karla Vanessa De Lira Ramos

Compiladores



2024

**Ernesto González Gaona**  
**Leandris Argentel Martínez**  
**Lucila Perales Aguilar**  
**Ofelda Peñuelas Rubio**  
**Alberto Margarito García Munguía**  
**Karla Vanessa De Lira Ramos**  
Compiladores

# **El Nopal: ecofisiología del nopal en México**



Pantanal Editora

2024

Copyright© Pantanal Editora

**Editor Chefe:** Prof. Dr. Alan Mario Zuffo

**Editores Executivos:** Prof. Dr. Jorge González Aguilera e Prof. Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

**Diagramação:** A editora. **Diagramação e Arte:** A editora. **Imagens de capa e contracapa:** Canva.com. **Revisão:** O(s) autor(es), organizador(es) e a editora.

### Conselho Editorial

#### Grau acadêmico e Nome

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos  
Profa. MSc. Adriana Flávia Neu  
Profa. Dra. Allys Ferrer Dubois  
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior  
Profa. MSc. Aris Verdecia Peña  
Profa. Arisleidis Chapman Verdecia  
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva  
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo  
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu  
Prof. Dr. Carlos Nick  
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos  
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva  
Profa. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos  
Prof. MSc. David Chacon Alvarez  
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira  
Profa. Dra. Denise Silva Nogueira  
Profa. Dra. Dennyura Oliveira Galvão  
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves  
Prof. Me. Ernane Rosa Martins  
Prof. Dr. Fábio Steiner  
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza  
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez  
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles  
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira  
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto  
Prof. MSc. João Camilo Sevilla  
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales  
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski  
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira  
Profa. Dra. Keyla Christina Almeida Portela  
Prof. Dr. Leandro Argente-Martínez  
Profa. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann  
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior  
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos  
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla  
Profa. MSc. Mary Jose Almeida Pereira  
Profa. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes  
Profa. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira  
Profa. Dra. Patrícia Maurer  
Profa. Dra. Queila Pahim da Silva  
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty  
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke  
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva  
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes  
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)  
Profa. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos  
MSc. Tayronne de Almeida Rodrigues  
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca  
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira  
Profa. Dra. Yilan Fung Boix  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

#### Instituição

OAB/PB  
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã  
UO (Cuba)  
IF SUDESTE MG  
Facultad de Medicina (Cuba)  
ISCM (Cuba)  
UFESSPA  
UEA  
UNEMAT  
UFV  
AJES  
UFGD  
UEMS  
IFPA  
UNICENTRO  
IFMT  
UFMG  
URCA  
ISEPAM-FAETEC  
IFG  
UEMS  
UFF  
(Colômbia)  
UNAM (Peru)  
IFRR  
UCG (México)  
Rede Municipal de Niterói (RJ)  
UNMSM (Peru)  
UFMT  
SED Mato Grosso do Sul  
IFPR  
Tec-NM (México)  
Consultório em Santa Maria  
UFJF  
UEG  
FAQ  
UNAM (Peru)  
SEDUC/PA  
IFB  
IFPA  
UNIPAMPA  
IFB  
UO (Cuba)  
UFMS  
UFPI  
UFG  
UEMA  
IFB  
UFPI  
FURG  
UO (Cuba)  
UFT

Conselho Técnico Científico  
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior  
- Esp. Maurício Amormino Júnior  
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Ficha Catalográfica

**Catálogo na publicação**  
**Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166**

N821

El Nopal: ecofisiología del nopal en México / Organizadores Ernesto González Gaona, Leandris Argente Martínez, Lucila Perales Aguilar, et al. – Nova Xavantina-MT: Pantanal, 2024.  
81p.

Outros organizadores: Ofelda Peñuelas Rubio, Alberto Margarito García Munguía, Karla Vanessa de Lira Ramos

Livro em PDF

ISBN 978-65-85756-21-1

DOI <https://doi.org/10.46420/9786585756211>

1. Ecología fisiológica. I. Gaona, Ernesto González (Organizador). II. Martínez, Leandris Argente (Organizador). III. Rubio, Ofelda Peñuelas (Organizador). IV. Título.

CDD 574.5

Índice para catálogo sistemático

I. Ecología fisiológica



Nossos e-books são de acesso público e gratuito e seu download e compartilhamento são permitidos, mas solicitamos que sejam dados os devidos créditos à Pantanal Editora e também aos organizadores e autores. Entretanto, não é permitida a utilização dos e-books para fins comerciais, exceto com autorização expressa dos autores com a concordância da Pantanal Editora.

**Pantanal Editora**

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.  
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.  
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).  
<https://www.editorapantanal.com.br>  
[contato@editorapantanal.com.br](mailto:contato@editorapantanal.com.br)

# Prólogo

---

El presente libro constituye un tributo a una de las especies vegetales que identifican a los Estados Unidos Mexicanos. Es el resultado del esfuerzo de un gran grupo de investigadores que forman parte de la Red Nacional del Nopal en México. Aquí hemos recopilado información clásica y científica sobre la capacidad que tiene el nopal para desarrollarse en la mayoría de los climas y ecosistemas de México, así como formas de propagación y principales usos.

Ente las organizaciones que han colaborado con la redacción del documento se encuentran la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), cuyo secretario es el Dr. Víctor Manuel Villalobos Arámbula, el Ing. Víctor Suárez Carrera, Subsecretario de Autosuficiencia Alimentaria, el Dr. Salvador Fernández Rivera, Coordinador General de Desarrollo Rural y el Lic. Ignacio Ovalle Fernández, Director General de Seguridad Alimentaria Mexicana.

Participaron además de manera activa un colectivo de directivos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), entre ellos Dr. Luis Ángel Rodríguez Del Bosque, Encargado del Despacho de los Asuntos de la dirección General del INIFAP, el Dr. Alfredo Zamarripa Colmenero Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación, el Dr. Luis Ortega Reyes, Coordinador de Planeación y Desarrollo y el Lic. José Humberto Corona Mercado, Coordinador de Administración y Sistemas.

Se destaca también la participación del Dr. José Antonio Cueto Wong, Director Regional del Centro de Investigación Regional Norte Centro, el Dr. Juan Bautista Rentería Ánima, director de Investigación, el Ing. Ricardo Carrillo Monsiváis, Director de Administración y Dr. Luis Reyes Muro, Director de Coordinación y Vinculación en Aguascalientes

Finalmente se hace mención especial al Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes y al Instituto Tecnológico Valle del Yaqui, del Tecnológico Nacional de México (TECNM), donde prestigiosos investigadores ofrecen acceso universal al conocimiento científico generado tras muchos años de investigación.

Los editores

# Resumen

---

<b>Prólogo.....</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo I.....</b>	<b>7</b>
Introducción al cultivo del Nopal.....	7
<b>Capítulo II.....</b>	<b>15</b>
Características de Los Nopales.....	15
<b>Capítulo III.....</b>	<b>27</b>
Selección del sitio y Plantación del Nopal.....	27
<b>Capítulo IV.....</b>	<b>37</b>
Manejo anual del Cultivo.....	37
<b>Capítulo V.....</b>	<b>45</b>
Usos y aprovechamiento de los Nopales.....	45
<b>Capítulo VI.....</b>	<b>64</b>
Generación de biogás y energía eléctrica.....	64
<b>Índice.....</b>	<b>79</b>
<b>Sobre los compiladores.....</b>	<b>80</b>

# Introducción al cultivo del Nopal




Huerta de Nopal tunero. Foto: Dr. Jaime Mena Covarrubias, INIFAP-CEZAC.


## Capítulo VI


### Generación de biogás y energía eléctrica

Recebido em: 01/12/2023


Aceito em: 08/12/2023

 10.46420/9786585756211cap6


Miguel Ángel Perales de la Cruz 

Ernesto González Gaona 

Catarino Perales-Segovia 

Héctor Silos-Espino 

Miguel Ángel Perales Vega 

Otilio García Munguía 

**A**ctualmente el planeta se enfrenta incertidumbre en la seguridad energética, debido a la fluctuación drástica en el precio del petróleo y al inminente agotamiento de los recursos fósiles. Además, la combustión de los hidrocarburos provoca un gran impacto nocivo en el medio ambiente y derivado de ello se ha generado el fenómeno ambiental conocido como calentamiento global, que es una consecuencia directa de las emisiones a la atmósfera de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero (GEI) (Cortez & Garibaldi, 2009).

La combustión de carbono fósil secuestrado en la tierra por millones de años principalmente en los hidrocarburos, ha provocado que en los últimos 50 años las concentraciones de GEI en la atmósfera haya pasado de 280 a 400 ppm, de las cuales, el 74% está en forma de CO<sub>2</sub> como un producto directo de la combustión, mientras que otros gases como el metano (CH<sub>4</sub>) representa el 21% de las emisiones de GEI, sin embargo, éste gas posee 23 veces mayor efecto invernadero que el CO<sub>2</sub>.

La demanda de energía se incrementa a un ritmo del 3.4% promedio anual global; sin embargo, en algunos países industrializados como China, la demanda alcanza valores de incremento a la demanda hasta del 10% anual, lo cual marca la necesidad de abastecerse con recursos energéticos, siendo el petróleo el combustible por excelencia, ya que tiene una mayor eficiencia energética y se encuentra al alcance de prácticamente toda nación. El petróleo abastece aproximadamente el 52% de la demanda energética, principalmente en forma de combustible para el transporte, seguido de otro recurso fósil que es el gas natural el cual abastece el 21% de la demanda para usarse como calor (Carbajal, 1998; Contreras & Toha, 1984).

Para cubrir el abasto energético mundial, se ha tratado de disminuir el uso de combustibles fósiles, como respuesta al problema actual que representa la extracción y distribución de hidrocarburos de los yacimientos explotados comercialmente en el ámbito mundial.



Recientemente, para producir combustibles se ha considerado como una opción viable y emergente el uso de biomasa, lo cual ha propiciado el auge los denominados “biocombustibles” que se originan a partir de la energía solar convertida por las plantas en energía química mediante el proceso de fotosíntesis. Estos son recursos que han sido estudiados intensamente en los últimos 30 años y se han descubierto algunos resultados prometedores.

Los biocombustibles se denominan de primera generación debido a que ocupan el primer eslabón en la producción de biomasa. Actualmente el bioetanol obtenido a partir de la caña de azúcar en Brasil y del almidón del grano de maíz en E.U.A. es el biocombustible de mayor uso, tanto Brasil como E.U.A. y concentran el 50% de la producción de bioetanol. Este biocombustible es oxigenante de la gasolina en sustitución del éter metil ter-butílico (MTBE), aunque también se puede utilizar solo como combustible en motores de combustión interna modernos (Clarck, 1995; López-Cruz, 2012).

La investigación de bioenergía se ha orientado recientemente a la búsqueda de especies vegetales con mayor eficiencia energética como es el caso del nopal, del que se puede obtener una alta producción de biomasa, aún bajo condiciones erráticas de precipitación, permitiendo además utilizar tierras marginales de bajo potencial productivo para cultivos alimentarios, destinándolas a la producción de biocombustibles, teniendo así bioenergéticos de primera generación sustentables, con la ayuda de los microorganismos presentes en el estiércol del ganado bovino que se utiliza como complemento de la biodigestión.

La primera etapa de las medidas adoptadas por México para asegurar el abasto energético, incluye la exploración de fuentes de biomasa de áreas de riego del centro y sur del país; sin embargo, el 52% del territorio nacional corresponde a zonas áridas y semiáridas del centro norte, las cuales no fueron tomadas en cuenta para el programa energético (Perales, 2009; Perales et al., 2009).

En las zonas áridas y semiáridas, excluidas originalmente del programa energético por ser consideradas como tierras marginales de bajo potencial productivo para cultivos tradicionales, se tienen las condiciones adecuadas para el establecimiento de plantas suculentas como el nopal *Opuntia* spp., el cual tiene una alta eficiencia en la producción de biomasa bajo las condiciones agroclimáticas que prevalecen en dichas zonas, visualizándose como una opción viable para la producción de biocombustibles de primera generación (Acevedo, 1983; García & Varnero, 1995; Perales et al., 2011a).

La producción de bioenergía a partir de la biomasa de nopal es una alternativa (Varnero & Arellano, 1990; Varnero et al., 1992; García & Varnero, 1995; Beshir & Yimam, 2018) que se ha implementado en otros países de América del Sur, como el caso de Chile, donde corporativos de la iniciativa privada han establecido Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) a través del uso de biomasa de nopal para la producción de biogás y por tanto de energía eléctrica (Guzmán, 1981; Picken, 1981; Baeza, 1995; Perales et al., 2011b).

### ***Descripción de la fábrica de Bioenergía de Calvillo, Aguascalientes***

La descripción que aquí se hace, corresponde a las instalaciones, infraestructura y equipo básico que integra el prototipo de una planta piloto para generar 1Mwh de energía eléctrica a partir de biomasa de nopal (Figura 1), la cual consta de área de oficinas, patio de recepción y maniobras, triturador, lavado de estiércol, homogeneizador, biodigestores, tanques de sedimentación, laguna de oxidación, mechero, medidor de flujo, filtro de piedra porosa, motor generador, regulador, cuarto de mando y cuarto de baterías.



**Figura 1.** Vista aérea de la planta piloto para la generación de biogás y energía eléctrica a partir de biomasa de nopal en Calvillo, Aguascalientes.

### ***Patio de recepción y maniobras***

En la Figura 2 se ilustra el área de ingreso del nopal, la cual está constituida por una superficie de 2,500 m<sup>2</sup> donde se recibe la biomasa de nopal, e inmediatamente se registra en una bitácora de almacén el peso del material que se recibe y el estado físico que presenta al momento de la llegada; posteriormente la biomasa se deposita en orden cronológico de recepción en uno de los dos patios de almacenamiento, con la finalidad de triturarlos en el orden de ingreso, asegurando una reserva de biomasa en caso de presentarse algún imprevisto como lluvias o algún otro factor inesperado que pueda impedir las labores de cosecha y no se afecte la producción diaria de biogás y generación de eléctrica.

1



**Figura 2.** Patio de recepción de biomasa de nopal para la generación de biogás.

En la misma área se recibe y almacena el estiércol fresco de bovino que se empleará en el proceso de biodigestión, manteniendo en el patio entre 5 a 15 ton tapado con una lona de protección, con la finalidad de garantizar la eficiencia biológica del estiércol fresco.

En caso de que el estiércol llegue a las instalaciones con menos del 50% de humedad, se debe hidratar con una mezcla de agua no clorada, adicionada con 2% de suero de leche de vaca para favorecer de manera inmediata la fermentación.

### *Triturador*

En la secuencia fotográfica que se muestra en la Figura 3, se aprecia la tolva principal de este dispositivo con una entrada de 3.81 m de ancho con dos reducciones cónicas posteriores; la primera reducción tiene una abertura de 2.4 m de ancho y la segunda de 1.24 m, la cual desemboca directamente en el área de trituración accionada por un rotor giratorio de martillos.



**Figura 3.** Esquema de trituración de biomasa de nopal.

La tolva es abastecida con pencas de nopal mediante la ayuda de una pala mecánica de tractor que alimenta el área del rotor de martillos donde se trituran entre 15 a 18 toneladas de biomasa de nopal por hora. El material triturado es expulsado por la escotilla de salida frontal como una mezcla líquida viscosa integrada por partículas de nopal de 3 a 5 mm de ancho.

### *Sistema de lavado de estiércol*

El sistema de lavado de estiércol se diseñó en mampostería de 2 m de ancho por 3 de largo, con tres canaletas provistas de un sistema de circulación de agua a presión que permite sedimentar la arena, piedras y material sólido ajeno al estiércol (Figura 4), dejando pasar a la maya final solo estiércol líquido que es depositado en la fosa de homogenización.



**Figura 4.** Descripción del sistema de lavado de estiércol para la biodigestión de biomasa de nopal.

### *Homogeneizador*

Un tanque cónico tipo cisterna de 30 m<sup>3</sup> cubierto con geomembrana sirve de contenedor para recibir la biomasa triturada y el estiércol lavado donde el sustrato se mezcla y homogeniza con agua antes de bombearlo hasta sistema de biodigestores.

La recepción de la mezcla debe tener una proporción de 99% de biomasa de nopal y 1% de estiércol, a la cual posteriormente se le adiciona un promedio de 30% de agua para diluirla y reducir su viscosidad, con la finalidad de facilitar el posterior bombeo al interior del biodigestor.



**Figura 5.** Homogeneizador de biomasa de nopal triturada y estiércol lavado.

La homogenización se logra forzando a que la mezcla circule durante un período de 10 a 12 minutos a través de un sistema de circulación a presión de dos bombas de 3 HP, que generan un sistema de turbulencia semejando un remolino que permite integrar la biomasa de nopal, el estiércol de bovino y el agua en una solución homogénea.

### ***Biodigestores***

El sistema de biodigestión está integrado por cuatro cámaras de fermentación de geomembrana, con una capacidad de almacenamiento de 1,000 m<sup>3</sup> cada una, adaptadas con una salida inferior de 12 pulgadas para desalojar lodos o sedimentos y una salida superior de 10 pulgadas para el desalojo de bióles líquidos, brindando una funcionalidad semejante al flujo continuo.

Cuenta además con un sistema interno de recirculación y un sistema de agitación de biodigestato basado en uso de bombas centrífugas sumergibles de 3 HP y flujo de 9 L por segundo. El interior del biodigestor se debe mantener a una temperatura constante entre 32 a 35 °C, una capacidad buferante de pH entre 7.0 a 7.2 y una CE en el rango de 5 a 7.5 dS/m.



**Figura 6.** Serie de biodigestores adecuados para la generación de biogás a partir de biomasa de nopal.

El control de la temperatura en un sistema de biodigestión mesofílica de biomasa de nopal, es considerado como endógeno, ya que se genera a través del movimiento, alimentación y respiración de los microorganismos presentes en la biomasa y solo se puede afectar si el pH baja a valores iguales o inferiores de 6.5. Si esto ocurre, la biomasa se estabiliza nuevamente con la adición de una solución alcalina preparada con 5 kg de cal diluida en 50 L de agua por cada decima del valor de pH que se pretenda incrementar.

En el interior de cada biodigestor existe un sistema de agitación horizontal que se activa para mover la mezcla contenida en cada cámara de fermentación desde las 8:00 am hasta las 16:00 pm, permitiendo de esta manera que en el biodigestato trabajen en condiciones ambientales por un periodo de 16 horas los microorganismos metanogénicos, cubriendo así el TRH requerido por la biomasa de nopal.

El sistema opera mediante la acción de una bomba centrífuga de 3 pulgadas con salida a ocho ramales que generan una circulación lenta de la biomasa, lo cual favorece la actividad de los microorganismos metanogénicos.

El proceso se complementa con un sistema de recirculación que al momento de la carga de biomasa fresca se opera mediante un panel de control como el que se ilustra en la Figura 7, haciendo circular mediante turbulencia el biodigestato de tal manera que permite invertir los lodos y residuos de biomasa digerida de la parte baja hacia la parte alta, al mismo tiempo que la biomasa fresca flotante de la parte superior se coloca en la parte baja, y en el transcurso de las 8 horas de trabajo de agitación se homogeniza el sustrato desde la base hasta la altura máxima, distribuyendo de manera uniforme los microorganismos con la finalidad de colonizar la mayor área posible del biodigestato.



**Figura 7.** Tablero de control de biodigestores de flujo continuo para la generación de biogás a partir de biomasa de nopal.

### ***Producción de biogás***

El resultado final del proceso de biodigestión en el interior de la cámara de fermentación, es el biogás, el cual está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El biogás que se genera en la planta piloto de Calvillo, Ags., tiene una concentración de metano entre 60 a 63%, lo que garantiza la eficiencia de conversión en el trabajo del motogenerador de esta planta, pues para el encendido de un motor se requiere una concentración mínima de 48% de metano.

Respecto a la medición del volumen de biogás producido en la planta piloto, esta se realiza mediante un medidor de flujo de biogás Proline-mass 65 (Figura 8), provisto de un sensor de gas que registra en tiempo real el volumen contenido en el biodigestor en  $\text{Nm}^3$ , el cual está colocado 2 m antes de la salida al mechero utilizado para la quema del biogás generado.

El medidor de la planta piloto de Calvillo, Ags., registra valores de producción de biogás entre 620 a 680  $\text{Nm}^3$  por tonelada de nopal en base seca, con flujos volumétricos de 210 a 450  $\text{Nm}^3/\text{h}$ , lo cual

se considera actualmente como el valor más alto de biogás obtenido en el mundo, seguido por los valores obtenidos en Chile que oscilan entre los 450 a 500 Nm<sup>3</sup>.



**Figura 8.** Medidor de flujo de biogás operado mediante sensor.

### *Filtro de biogás*

Debido a que el biogás generado en la cúpula de los biodigestores induce una temperatura de salida de hasta 68 °C y a que existe la probabilidad de que contenga trazas de ácido sulfhídrico, se requiere que este sea filtrado para asegurar su pureza química.

El filtro diseñado para la planta piloto de Calvillo Ags., consta de un sistema de entrada de biogás por la parte inferior del filtro donde se encuentra una base de agua y posteriormente el 50% de su capacidad es llenado con piedra tezontle para eliminar el ácido sulfhídrico y enfriar el biogás en su ascenso a la salida del filtro por la parte superior como se ilustra en la Figura 9.



**Figura 9.** Filtro de agua y piedra tezontle para biogás de biomasa de nopal.

Al final de la línea de salida existe un soplador con válvula check de un solo sentido, el cual tiene la función de suministrar un flujo constante de biogás para el funcionamiento continuo del motor generador de electricidad.

## PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### *Motor generador*

La planta piloto cuenta con un equipo de moto generación de energía eléctrica CATERPILAR (CAT MR) cabinado (Figura 10), provisto de un motor de combustión interna de 16 pistones en V, con capacidad de trabajo a 1,335 Kva. Cuando el motor recibe el biogás generado en las cámaras de fermentación, enciende e inmediatamente inicia el movimiento del cigüeñal y pistones que generan sinergia y presión para inducir la secuencia de trabajo del generador eléctrico.



**Figura 10.** Motor generador de 1Mwh operado con biogás de biomasa de nopal.

Para que el motor comience a trabajar, el sistema demanda un flujo de biogás con una concentración mínima promedio de metano de 48% y un flujo de biogás de 350 a 400 Nm<sup>3</sup>/hr; sin embargo, los biodigestores de la planta piloto de Calvillo, Ags., tienen la capacidad de suministrar biogás con un contenido promedio de 62% de metano y bajo esta concentración, el sistema de la planta piloto demanda mantener un flujo de biogás de 250 a 300 Nm<sup>3</sup>/hr que será el responsable de generar 1,000 kwh en 480 volts.

### *Transformador*

Adjunto al motor generador se encuentra un transformador de voltaje (Figura 11), el cual recibe 480 volts de energía producidos por el generador eléctrico y se encarga de incrementarlos hasta 13,200



volts que es el valor mínimo de energía requerida para poder tener el acceso al suministro eléctrico de una la línea de media tensión administrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

El voltaje transformado se deposita en una línea de tensión media de la subestación “El Salitre”, y una vez que pasa al sistema de transferencia de energía se usa para el consumo en la planta procesadora de cemento Cruz Azul Hidalgo, mediante el pago por el servicio de porteo a la CFE.



**Figura 11.** Vista del generador para elevar de 480 a 13200 volts.

#### *Cuarto de baterías*

En un sistema de generación de energía eléctrica, siempre se debe considerar una fuente de energía alterna que proteja al motor generador de un daño severo ante la presencia de alguna eventualidad de falla en sistema de suministro eléctrico por parte de la CFE, por lo cual se diseñó un cuarto de baterías como el que se muestra en la Figura 12, con un bloque de baterías en serie, que durante un periodo de 10 segundos suministra la energía necesaria para inducir el apagado de emergencia en el motor generador.



**Figura 12.** Vista externa del cuarto de baterías y el interior con las baterías en serie.

### ***Mechero***

En el caso de que la planta piloto de Calvillo Ags., tuviera una sobre producción de biogás, se diseñó un mechero de 12 pulgadas de diámetro como el que se muestra en la Figura 13, con la finalidad de quemar los excedentes de biogás producidos en el sistema de biodigestión y para evitar la contaminación ambiental en caso de tener la necesidad de liberar el citado biogás por motivos de seguridad.

El mechero cuenta con un piloto de ignición con sensor automático, para encenderse al momento de detectar la presencia de biogás y es activado mediante la chispa generada por una batería alimentada por un panel solar que provee de energía permanente al piloto de encendido durante las 24 horas del día; el mechero tiene la capacidad de quemar un flujo de hasta 850 Nm<sup>3</sup>/hora.



**Figura 13.** Ilustración de mechero utilizado para la quema de excedentes de biogás.

### ***Tanques de sedimentación***

El proceso de generación de biogás y energía eléctrica a partir de biomasa de nopal en la planta piloto de Calvillo, Ags., obliga a tener diariamente un volumen de entrada de biomasa cruda a los tanques de fermentación y un volumen de salida de biomasa procesada semejante desde el interior de los biodigestores.

La biomasa de nopal procesada sale de los biodigestores por gravedad y es conducida por tubería al tanque de sedimentación inicial (Figura 14), que recibe bióles con un contenido promedio de 90 a 95% de material líquido y el resto sólido en partículas finas, que sirven como base para elaborar biofertilizantes líquidos y sólidos de uso agrícola.



**Figura 14.** Sedimentador 1 para residuos del sistema de biodigestión mesofílica de biomasa de nopal.

El sedimentador inicial se conecta al sedimentador secundario mediante un sistema de tubería de PVC de 6 pulgadas a una altura de 90 cm, lo cual permite que los materiales sólidos se queden en el fondo del sedimentador inicial y el material líquido pase por gravedad al sedimentador secundario.

Mediante un sistema de bombas centrífugas para sólidos, el material del fondo del sedimentador inicial es adsorbido y pasado por un separador de fibras cortas que se encuentra entre los dos sedimentadores, como se ilustra en la Figura 15.



**Figura 15.** Sedimentador 2 y separador de fibras finas para residuos del sistema de biodigestión mesofílica de biomasa de nopal.

### ***Laguna de oxidación***

La laguna de oxidación es una excavación en el suelo recubierta con geomembrana (Figura 16), y se diseñó para almacenar temporalmente los bióles resultantes de la digestión de biomasa de nopal, de donde se obtendrá el material base para la formulación de biofertilizantes líquidos y sólidos como subproducto del nopal.

En la laguna de oxidación receptora de los bióles de nopal, se emplea un sistema de oxigenación mediante la circulación continua de lanchas de pilas recargables, estas lanchas favorecen el incremento del oxígeno en los bióles, permitiendo la eliminación de la carga de microorganismos de origen anaeróbico y asegurar así que el material base para los biofertilizantes contiene al final solo microorganismos aeróbicos que un futuro próximo serán fortificados con microorganismos de cepas cultivadas que servirán de inóculo para mejorar el trabajo de los biofertilizantes formulados.



**Figura 16.** Fosa de oxidación final de bióles generados a partir de la biodigestión de biomasa de nopal.

### ***Beneficio económico del proyecto***

Los resultados obtenidos en la generación de energía eléctrica a partir de la biodigestión de biomasa de nopal, revelan que el costo de producción por kw, es en promedio de \$0.60 a \$0.63, el cual, comparado con el costo comercial de \$1.85 por kw que paga la industria, representa un ahorro entre 293.65 a 308.33% y permite tener un periodo promedio de recuperación de la inversión entre 18 a 24 meses.

### ***Impacto ambiental***

La planta piloto de generación de biogás y energía eléctrica de Calvillo, Ags., descrita en el presente documento demuestra categóricamente que es un proyecto ecológico sustentable con cero generación de residuos nocivos para el medio ambiente, ya que el manejo integral de la planta de nopal permite aprovechar el biogás en la generación de energía eléctrica y los bióles resultantes de la

biodigestión son utilizados como complemento en el agua de riego de las plantaciones de nopal y en la elaboración de biofertilizantes líquidos y compostas enriquecidas. Únicamente se genera basura comercial que es depositada en contenedores de residuos que posteriormente una empresa de servicios de limpieza especializada traslada a sitios de confinamiento autorizados.

### ***Impacto social***

La implementación del proyecto en la región, es un detonador del empleo para la zona El Salitre-La Rinconada en el municipio de Calvillo, Ags, ya que generó un promedio de 90 empleos diarios en las áreas de cultivo de nopal y 15 empleos en la planta de generación de energía eléctrica, todos con las prestaciones de seguridad médica y sociales que marca la legislación actual más incentivos internos que la Cooperativa la Cruz Azul destina al desempeño de sus trabajadores.

### **LITERATURA CITADA**

- Acevedo, E. (1983). Biomasa y energía. *Simiente*, 53, 3-13.
- Baeza, J. (1995). Aprovechamiento del desecho del cultivo de la cactáceas. *Opuntia ficus cacti* para la producción de biogas. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago.
- Beshir, B. J., & Yimam, A. (2018). Study on the biogas energy potential of cactus *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. *Ethiopian Journal of Science and Sustainable Development*, 5(2), 83-92.
- Carvajal, M. (1998). Estudio ambiental de la utilización de GNC y CLP como combustible en vehículos livianos duales en uso. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Mecánica. Santiago, Chile.
- Clark, N. N. (1995). Emissions for Alcohol, Natural Gas, Diesel and Biodiesel Buses. *Proceedings of the Fifth CRC On-Road Vehicles Emissions Workshop*.
- Contreras, S., & Toha, C. (1984). Biogas Production from suspension of Homogenized Cladodes of the cactus *Opuntia cacti*. *Journal of Fermentation Technology*, 62(6), 601-605.
- Cortez, C. M. A., & Garibaldi, F. M. (2009). Construcción de biodigestores a pequeña escala. In J. López Gómez, M. A. Perales de la Cruz, & E. González Gaona (Eds.), *Memoria. V Curso Taller de Actualización de Productores Rurales para el Desarrollo de las Zonas Áridas* (pp. 19-22). Ojo Caliente, Zac. México.
- García, De C., V., & Varnero, M. T. (1995). Energy production. In G. Barbera, P. Inglese, & E. Pimienta B. (Eds.), *Agroecology, cultivation and uses of cactus pear* (pp. 186-211). FAO Plant Production and Protection paper 132.
- Guzmán, J. (1981). Recursos energéticos no tradicionales para la década del 80. Departamento de Química de la Universidad Católica de Chile. Núm. 81, Santiago, Chile.
- López-Cruz, J. (2012). Evaluación de cinco mezclas nopal/estiércol para la generación de biogás bajo condiciones de campo en el estado de Aguascalientes. Tesis de licenciatura, ITEL, El Llano, Ags.

- Perales C. M. A., Beas, R. C., Mendoza, M., Perales V., M. A., & Silos E. H. (2011a). Evaluación de mezclas de nopal/estiércol para la generación de biogás en las zonas áridas de México. In R. J. J. Martínez, N. Vázquez, R. Santana, A. Martínez, R., & J. Fuentes, G. (Eds.), Memorias de la XXIII Semana Internacional de Agronomía (pp. 1109-1112). Universidad Juárez del Estado de Durango. Gómez Palacio, Dgo.
- Perales, C. M. A. (2009). Sistemas de producción de energía alternativa. In J. López Gómez, M. A. Perales de la Cruz, & E. González Gaona (Eds.), Memoria. V Curso Taller de Actualización de Productores Rurales para el Desarrollo de las Zonas Áridas (pp. 23-36). Ojo Caliente, Zac. México.
- Perales, C. M. A., Perales V., M. A., Garbaldi M. F., & Cortes Ch. M. A. (2011b). Validación de la generación de biogás a partir de biomasa de nopal (*Opuntia ficus indica*). In Congreso Internacional sobre biocombustibles 2011. Boca del Río, Ver. Perales, V. M. A., Perales, M. A., Ramos, L. R., & Perales, C. (2009). Evaluación de la producción de biogás en zonas áridas a partir de biomasa de nopal (*Opuntia ficus indica*). In Memoria de la 55 Reunión Anual del PCCMCA. Campeche, Méx. Septiembre del 2009.

# Índice

---

	<b>C</b>	México, 1, 4, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 18, 20, 28, 36, 37, 38, 40, 44, 46, 47, 48, 56, 64, 79, 80
Cactáceas, 79		
	<b>E</b>	
Especies, 40		
	<b>L</b>	
lindheimeri, 8, 18		
	<b>M</b>	
Metabolismo, 20		
	<b>O</b>	
		Opuntia, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 44, 48, 49, 51, 54, 56, 64
	<b>S</b>	
		streptachantha, 18
	<b>T</b>	
		Tuna, 47

## Sobre los compiladores

---



**Dr. Ernesto González Gaona.** Investigador Titular del Programa de Sanidad Forestal y Agrícola del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, adscrito al Campo Experimental Pabellón en Aguascalientes desde 1984, Miembro del SNII Nivel 1. Líneas de Investigación: Manejo orgánico biológico de plagas y enfermedades en Guayaba, Nopal, Vid, Maíz, así como plagas forestales con énfasis en defoliadores de la familia Diprionidae.



**Dr. Leandris Argente Martínez.** Profesor Investigador Titular C, del Tecnológico Nacional de México, Campus valle del Yaqui. Doctorado en Ciencias Biotecnológicas por el Instituto Tecnológico de Sonora. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1. Profesor Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Líder del Cuerpo Académico ITVAYA-CA-3. Línea de investigación: Agricultura sustentable, Fisiología, Bioquímica, Biología Celular y Molecular del estrés.



**Dra. Lucila Perales Aguilar.** Profesora Investigadora del Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, miembro del SNII candidata, con experiencia en biotecnología de plantas del semidesierto y remediación de suelos contaminados con metales pesados. Profesor con perfil deseable de la Secretaría de Educación Pública. Línea de investigación sobre Producción de Cactáceas y Agavaceas in vitro y remediación de suelos del semidesierto.



**Dra. Ofelda Peñuelas-Rubio.** Profesora Investigadora Titular C, del Tecnológico Nacional de México, Campus valle del Yaqui Doctorado en Ciencias Biotecnológicas por el Instituto Tecnológico de Sonora. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1. Profesora Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Miembro del Cuerpo Académico ITVAYA-CA-3. Línea de investigación: Agricultura sustentable, Fisiología, Bioquímica, Biología Celular y Molecular de sistemas terrestres y costeros.





**Dr. Alberto Margarito García Munguía.** Profesor Investigador Titular C, de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNII) Nivel 2. Profesor Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Miembro del Cuerpo Académico Protección Vegetal. Línea de investigación: Manejo Integral de Plagas, Manejo de agroquímicos y biológicos, Autodiseminación de Entomopatógenos.



**MC. Karla Vanessa De Lira Ramos.** Investigadora Titular del Programa de Sanidad Forestal y Agrícola del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, adscrita al Campo Experimental Pabellón en Aguascalientes desde 2014. Líneas de Investigación: Manejo orgánico biológico de plagas y enfermedades en Guayaba, Nopal, Vid, Maíz, así como plagas forestales y resistencia a *Begomovirus* en Chile.



**Pantanal Editora**

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000

Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil

Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp)

<https://www.editorapantanal.com.br>

[contato@editorapantanal.com.br](mailto:contato@editorapantanal.com.br)