

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

PROGRAMA DE ENERGÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

TÍTULO:

**"Estudio de la vaina de mezquite (*Prosopis laevigata*) del
Estado de Hidalgo, México
como materia prima para producir biocombustible"**

PRESENTA

GABRIEL CHÁVEZ RUBIO

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ALBERTO MENDOZA ESPINOZA

CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO, 2026

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Lugar donde se realizó el posgrado:

UACM, Plantel Del Valle.

Director de tesis:

Dr. José Alberto Mendoza Espinoza
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Agradecimientos.

A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, por la oportunidad brindada de continuar mis estudios.

Al Dr. José Alberto Mendoza Espinoza por su dedicación y mostrarme el camino de investigación y lograr un producto final digno de presunción.

Al Dr. Edgar Vicente Torres Gonzáles, Dr. Ernesto López Chávez y Dr. Fernando Días de León Sánchez por ser parte del jurado de la presente investigación y por sus observaciones realizadas.

A Jonathan y Luz por sus primeras enseñanzas y paciencia en el laboratorio.

A esos amigos que llevan más de 30 años siéndolo; Noe, Ignacio, Guillermo, Irving.

A Mónica Contreras, por orientarme en la parte técnica de mi investigación

A mi madre por apoyarme en la decisión de seguir mis estudios.

A mi tío Adrián, por ser el origen de esta investigación, por ser quien fue, por ser un padre para mí y siempre apoyarme en todos y cada uno de mis proyectos.

“Probabilidades que despojan de certezas desgastadas de un Ángel caído, es un Cisne Negro reinventado en Dulce Locura, un mundo, una vida, nuestra vida...”

Contenido

Agradecimientos.....	2
Contenido.....	3
Introducción.....	5
Justificación.....	6
Hipótesis.....	7
Objetivos.....	7
1 Marco de referencia.....	8
1.1 Situación energética global.....	8
1.2 Situación energética en México.....	13
1.2.1 Bioenergía, situación nacional.....	16
1.2.2 Bioetanol en México.....	19
1.3 Biomasa.....	21
1.3.1 Clasificación de la biomasa.....	22
1.4 Biocombustibles.....	24
1.4.1 Generaciones de biocombustibles. Ventajas y desventajas.....	24
1.5 Generalidades del mezquite.....	27
2 Marco teórico.....	31
2.1 Características generales del etanol y su uso como biocombustible.....	31
2.2 Producción de bioetanol.....	33
2.2.1 Pretratamientos.....	34
2.2.2 Hidrólisis.....	35
2.2.3 Fermentación.....	36
2.2.4 Destilación.....	38
3 Metodología.....	40
3.1 Obtención y selección de la materia prima.....	40
3.2 Pretratamiento mecánico.....	41
3.3 Presencia de azúcares reductores.....	42
3.4 Análisis de los espectros de infrarrojo.....	43
3.5 Pretratamiento hidrotermal e hidrólisis.....	45

3.6	Fermentación.	46
3.7	Destilación	47
4	Resultados.....	48
	Conclusiones.	59
	Índice de imágenes.	61
	Índice de tablas.	62
	Referencias bibliográficas	63

Introducción

En el marco mundial de promoción para la creación de fuentes alternativas de energía, se ha destacado y promovido toda investigación que ayude a la generación de energía a través de fuentes renovables. (United Nations, 2021)

La generación de biocombustible se ha centrado principalmente en materias primas como el maíz, caña de azúcar, canola, soya y otro tipo de materias primas consideradas como biomasa. (Vargas y otros, 2022). La producción de bioetanol no solo se limita a la creación de un combustible, durante el proceso es posible obtener subproductos que enriquecen el aprovechamiento de la biomasa, por ejemplo, es posible utilizar biodigestores para que parte de los residuos del sustrato se utilicen para la producción de biogás y otra parte se pueda utilizar como fertilizantes de alta calidad.

En el estado de Hidalgo, México, esta materia prima no es abundante y por lo tanto no es una alternativa para la generación de biocombustibles. El clima semidesértico nos brinda una oportunidad de investigación de otro tipo de biomasa que puede ser aprovechable.

Uno de los mayores retos para nuevas investigaciones en generación de biocombustibles es encontrar materias primas abundantes que a su vez no impacten en la producción de alimentos tanto para consumo humano como animal. Así como minimizar el gasto energético del proceso y reducir al mínimo el uso de agua para la obtención de la biomasa.

En la presente investigación nos enfocaremos en el pretratado, fermentación y destilación de la vaina de la *Prosopis laevigata*, que es una variedad de mezquite abundante en la región para su utilización como materia prima para la obtención de bioetanol.

Justificación

La vaina de la *Prosopis laevigata* es una materia prima cuya investigación se ha centrado en su uso nutricional y en los últimos años se ha usado para hacer destilados en ciertas regiones de Hidalgo. (Sciammaro y otros, 2015) (Daniel y otros, 2015) (M. en C. Luis, 2019). Se encuentran pocas investigaciones para su aprovechamiento como biocombustible y se centran en investigaciones de otras variedades de la planta como la *Prosopis glandulosa* o la *Prosopis juliflora*. (Morán Guillén y otros, 2017) (Silva y otros, 2011)

Una de las formas tradicionales en que se prepara la vaina del mezquite es hervirla y servirla como postre, la harina también es utilizada para hacer pan, atole y otras golosinas. El sabor dulce de estos productos nos da una idea de la presencia de azúcares, pero para nuestro caso será necesario saber si estos azúcares son idóneos para la producción de bioetanol. La variedad que será estudiada es abundante en la región y aunque ya se utiliza para ciertos productos nutricionales no hay una industria en torno a este fruto y por ende tampoco un comercio dedicado a su explotación de manera que tenga un impacto económico considerable.

El árbol del mezquite es abundante y su distribución es extensa en la región, con ello se tiene una amplia disponibilidad de la materia prima. Así mismo cumple de manera óptima las políticas nacionales en materia de agua las cuales definen que el uso sustentable de agua se logra cuando: “Se genera un bienestar social, propicia el desarrollo económico y se preserva” (Presidencia de la República, 2014), de tal forma que el impacto en su uso sea un factor de sustentabilidad y no un problema para la comunidad donde será aprovechada.

Los residuos generados durante el proceso podrían ser aprovechados para generación de biogás por medio de biodigestores o para enriquecer composta que ayude a fertilizar el suelo de acuerdo con investigaciones posteriores junto con las ya realizadas en estos rubros. (Fernández E., 2010) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Buenos Aires, Argentina., 2019)

Hipótesis.

La vaina de *Prosopis laevigata* contiene azúcares fermentables que permiten la producción de bioetanol y junto con microorganismos de la región nativos del pulque, permiten la producción de bioetanol en concentraciones comparables a las obtenidas con levaduras comerciales.

Objetivos.

General.

Evaluar el potencial de la vaina de *Prosopis laevigata* como materia prima para la producción de bioetanol mediante un proceso de fermentación asistido por microorganismos presentes en el pulque.

Específicos.

- Determinar el contenido de humedad de la vaina de *Prosopis laevigata* como parámetro inicial para su acondicionamiento y procesamiento.
- Determinar la presencia de azúcares reductores en la vaina del mezquite.
- Determinar un pretratamiento mecánico, hidrotermal y/o ácido de la vaina del mezquite para maximizar la liberación de azúcares fermentables, expresados en grados Brix (°Bx).
- Comparar la eficiencia fermentativa de microorganismos nativos del pulque frente a levaduras comerciales en la producción de bioetanol.
- Determinar el tiempo óptimo de fermentación que permita maximizar la concentración de etanol producido.
- Optimizar el proceso de destilación para obtener bioetanol con el mayor grado de pureza posible a partir del fermentado obtenido

1 Marco de referencia.

1.1 Situación energética global.

Según el reporte anual World Energy Outlook de la Agencia Internacional de Energía (AIE) 2024, sucederá una transición comparable con la que hubo en el siglo XX al pasar de un consumo energético mayoritariamente de carbón a uno de hidrocarburos. En el presente siglo habrá una transición de estos últimos a la utilización de electricidad como principal fuente de energía mundial.

Sin embargo, enfatiza que la generación de electricidad será principalmente generada empleando procesos renovables, estimando que para el año 2030, al menos la mitad de su generación sea a través de estas tecnologías. La razón principal: mantener una tendencia a la baja de emisiones contaminantes, considerando el hecho de que es posible generar energía limpia que logre este objetivo.

El reto principal para la humanidad será crear los instrumentos de inversión suficientes para lograrlo, ya que es necesario llegar a niveles de gasto sin precedente. El mismo informe hace hincapié en que los temas geopolíticos jugaran un papel importante para que los escenarios previstos se cumplan, Imagen 1-1. Principalmente los engloban de tres formas:

1. Stated Policies Scenario (STEPS), que es el escenario con las políticas actuales donde se estima que llegará al punto más alto de generación energética y consumo de petróleo, carbón y gas natural en el 2030.
2. Announced Pledges Scenario (APS), donde de manera optimista se proyecta que los países serán capaces de lograr las metas anunciadas en los plazos acordados.
3. Net Zero Emissions (NZE), donde de manera utópica se establece que para el año 2050 se logrará que el 90 % de la demanda energética mundial será a través de energías limpias y el resto sea difuminada poco a poco con emisiones negativas de bioenergía u otras formas de eliminación de carbono.

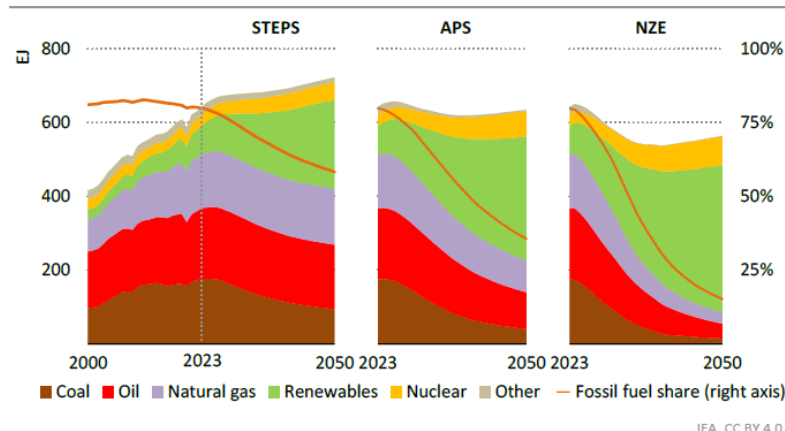
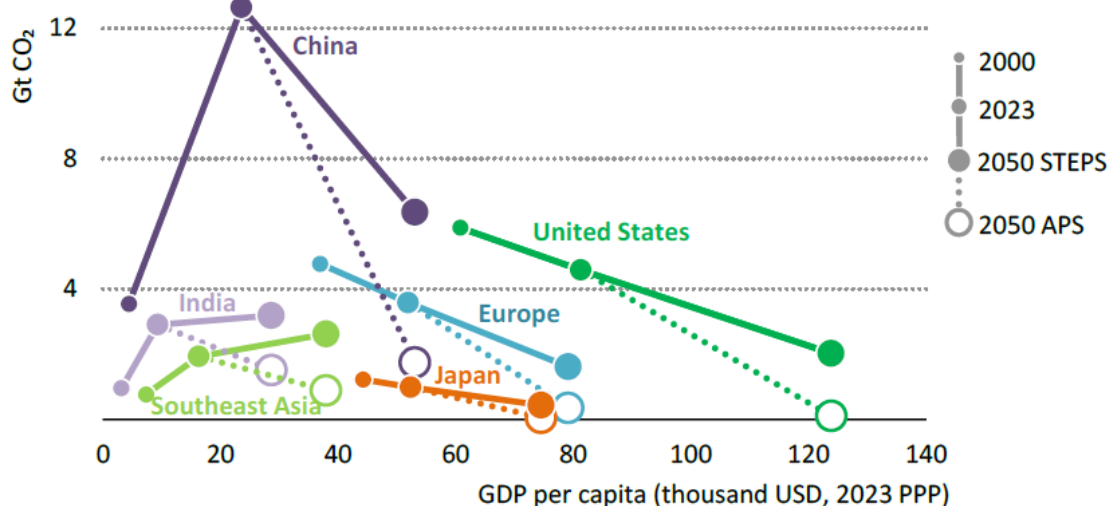


Imagen 1-1. Distribución de fuentes de energía en tres diferentes escenarios. (Agencia Internacional de la Energía, 2024)

En el primer escenario la demanda de energía de combustibles fósiles para el 2050 se espera se reduzca a un 58 %. Esto contrasta con el objetivo del tercer escenario donde se estima que el 90 % del consumo será generado con energías limpias.

Por otro lado, la emisión de CO₂ en los tres escenarios muestran un pico máximo en el 2030, para luego descender a un ritmo del 1 % anual en el caso de STEPS y en el mejor de los casos en un 15 % anual en el NZE. Sin embargo, el contraste geopolítico jugará un papel importante en lograr estas metas, la correlación existente entre el desarrollo económico de un país y su demanda energética van a la par, siendo este un reto para países de Sudamérica, Sureste de Asia e India, ya que al estar en un proceso de crecimiento económico tienen por defecto un crecimiento energético correlacionado. Lograr que mejoren sus economías aumentando su consumo con energías limpias es un tema a discusión de los años venideros.

Acorde a la información mostrada en el World Energy Outlook de la AIE 2024 (Agencia Internacional de la Energía, 2024) India y el Sureste de Asia tendrán un aumento en la generación de CO₂ a diferencia de países como Estados Unidos, Japón y la zona europea que mostrarán una tendencia a la baja a partir de la tercera década del siglo XXI. Incluso la correlación de economía vs generación de CO₂ se ve claramente marcada en el caso de China, donde se puede observar que será el país que logrará una disminución mucho más pronunciada que le resto del planeta, logrando hasta un 3 % de forma anualizada. Imagen 1-2.



IEA. CC BY 4.0.

*Global CO₂ emissions peak and gradually decline to 2050,
led by sharp drops in China as well as in advanced economies*

Note: Gt CO₂= gigatonnes of carbon dioxide.

Imagen 1-2. Generación de CO₂ per capita proyectada. (Agencia Internacional de la Energía, 2024)

Aunque se espera que a los próximos años donde la electricidad tendrá un papel relevante en el consumo de energía, el informe menciona que no se está logrando generar energía limpia al ritmo que el mundo está demandando. El cambio climático obliga a que la población use cada vez con más frecuencia aires acondicionados, La reciente incorporación masiva al mercado nacional de autos eléctricos y el creciente uso de la inteligencia artificial que utilizan *centro de procesamiento de datos (CPD)*, son solo tres ejemplos donde la demanda de energía eléctrica se verá rebasada con la generación de energías limpias si no se hacen pronto inversiones millonarias. Tan solo en 2024 se calcula hubo una inversión global de 2 billones de dólares en energías limpias, aproximadamente un 200 % más que lo dedicado a energías generadas por combustibles fósiles. Y para lograr un acceso universal de energía en el año 2030 se estima se necesitarán 55 billones USD anuales, los valores actuales son un poco menos de 10 billones USD por año. (Agencia Internacional de la Energía, 2024)

Acorde a los datos anteriores y considerando escenarios más realistas, se ha adoptado el concepto de “transición energética”. La International Renewable Energy Agency, en su reporte, 2023, considera dos escenarios teniendo como objetivos el 2050 y el 2100: “Planned Energy Scenario”, donde al igual que el STEPS del AIE considera los planes,

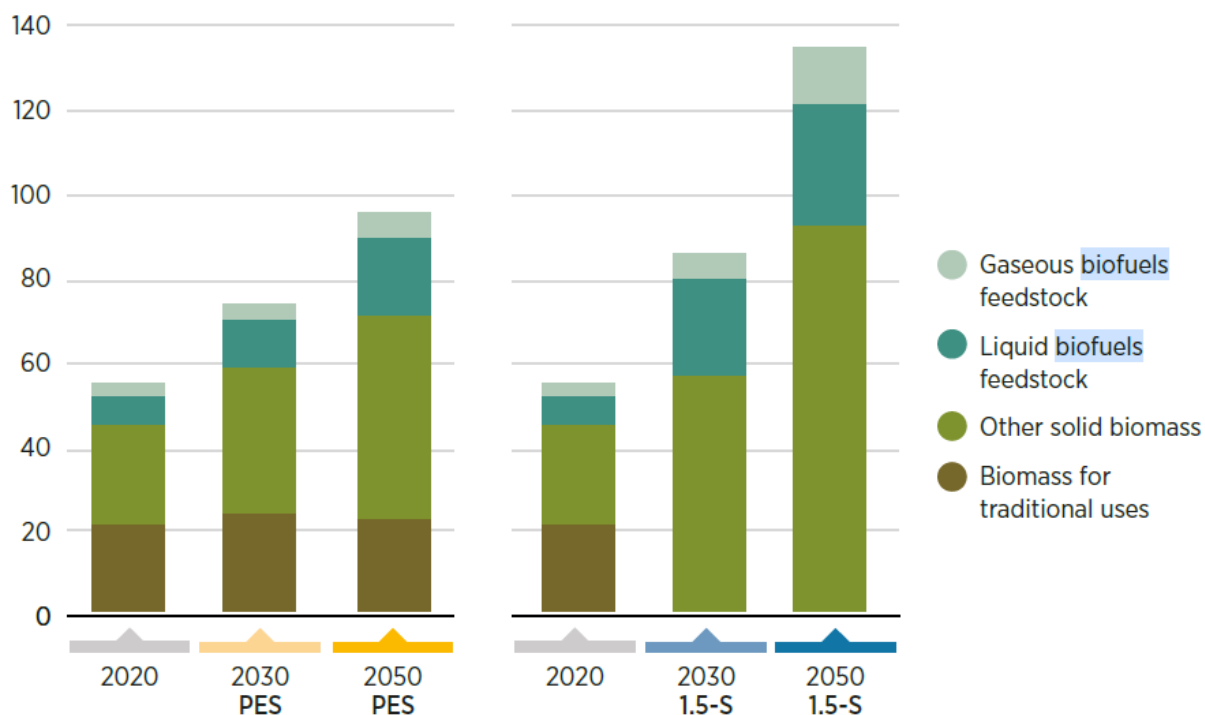
estrategias y objetivos, pero enfocados a países del G20 y el “1.5°C Scenario” donde considera el objetivo de limitar el aumento de temperatura promedio global a 1.5 °C para final de siglo.

Ambas agencias coinciden que el uso de la electricidad será la principal forma de consumo de energía, La *International Renewable Energy Agency* (IRENA) menciona que considerando el escenario “1.5°C”, el 91 % de la electricidad será generada con fuentes renovables, un incremento considerable con respecto al 2020 que era del 28 %. Pronostica que el uso de carbón e hidrocarburos quedarán en desuso, pero el gas natural se mantendrá con un 5 % y un 4 % con plantas nucleares.

El reporte indica, como parte de este proceso, “Es necesario destinar mayores volúmenes de financiación a otras tecnologías de transición energética, como los biocombustibles, la energía hidroeléctrica y la geotérmica, así como a sectores más allá del energético que tienen una menor proporción de energías renovables en el consumo final total de energía” así también “La bioenergía para usos modernos en diversas formas (p. ej., biomasa sólida, biogás, biometano y biocombustibles líquidos) proporcionarán el 22 % de la energía primaria total para 2050, es decir, 2,5 veces los niveles actuales. En el sector del transporte, los biocombustibles sostenibles cubrirían el 13 % del Consumo Final Total de Energía (TFEC, por sus siglas en ingles) para 2050.” (IRENA, 2023, pág. 25 y 50). Una de las razones para ello es que la industria podría adoptar el uso de biocombustibles de forma tersa, porque no es necesario realizar grandes modificaciones en los sistemas y por ende la inversión es más asequible para ella y también para particulares y gobierno.

Hasta ahora la biomasa ha tenido la siguiente distribución: 43 % biomasa sólida, 39 % para uso de cocina y calefacción en países en desarrollo y solo un 18 % como materias primas de biogás y biocombustibles. Esta distribución se contempla debe cambiar según los escenarios propuestos por la IRENA, de los 56 exajulios (EJ) que se generaron en el 2020 a 95 EJ en el caso del “Planned Energy Scenario” y a 138 EJ para el caso de “1.5 °C Scenario”, teniendo como reto reducir al mínimo el uso ineficiente de biomasa que se usa actualmente para cocinar y como calefacción. La distribución propuesta sería como la mostrada en la Imagen 1-3.

Primary bioenergy supply (EJ)



Notes: 1.5-S = 1.5°C Scenario; EJ = exajoule; PES = Planned Energy Scenario.

Imagen 1-3. Distribución de biocombustibles en dos escenarios posibles. (IRENA, 2023)

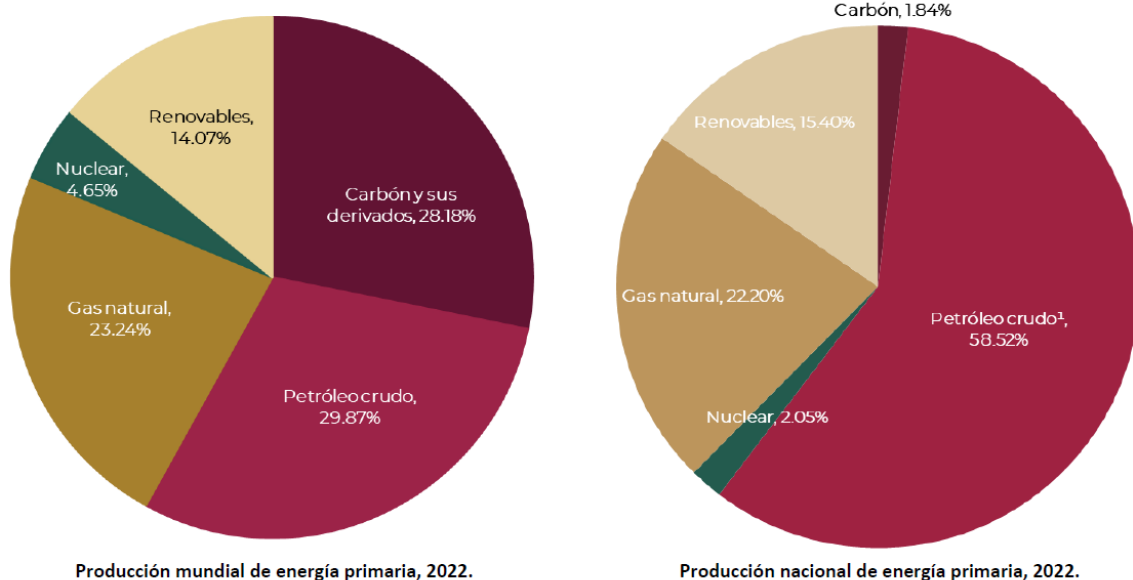
Tenemos entonces que el sector de bioenergía juega un papel importante en la transición energética. Por ello se recomienda implementar políticas, obligaciones, subsidios, devoluciones fiscales, regulaciones, certificaciones, apoyos económicos para proyectos de infraestructura dedicados a la investigación y desarrollo en temas bioenergéticos. Dicho sector deberá acompañar al desarrollo en tecnología solar, eólica y otras para que la transición logre los objetivos deseados en los tiempos propuestos.

1.2 Situación energética en México

“Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” es parte de los objetivos y metas adoptados por México en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en el marco de la agenda 2030 global. (Secretaría de Energía, México, 2023)

En el año 2022 México producía un 58.52 % de petróleo crudo del total de energía generado a nivel nacional, esto contrasta con el 29.87 % que se produce a nivel mundial en este rubro. Si este dato se lee de forma aislada veríamos una diferencia significativa del rumbo que a nivel global está tomando, pero vemos que el mundo produce un 23.2 % de gas natural y un 28.18 % de carbón, versus 22.20 % y 1.84 % respectivamente a nivel nacional. Con ello tenemos que, a nivel global, los hidrocarburos junto con el carbón son de un 81.29 % mientras que en México 82.56 % un valor muy parecido al promedio del resto de los países, como se puede ver en la Imagen 1-4.

ESTRUCTURA DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL Y NACIONAL DE ENERGÍA PRIMARIA 2022
 (Porcentaje)



FUENTE: Elaboración propia SENER con información de World Energy Balances, AIE, edición 2024.

NOTA: La suma de los parciales puede no coincidir con los totales debido al redondeo de las cifras.

¹Incluye la producción de condensados que representa el 7.54% de la producción nacional de energía primaria.

Imagen 1-4. Comparativo de producción mundial vs nacional.

Sin embargo, el consumo nacional se distribuye de manera diferente. Parte de la energía primaria se utiliza para la generación de energía eléctrica, el resto se consume directamente a través de petrolíferos y gas natural. Cabe resaltar que el consumo a nivel mundial entre derivados del petróleo, gas natural, carbón y subproductos es de un 65.47 %

y a nivel nacional es de 72.4 %, en consumo de carbón tenemos a nivel mundial un 8.85 % y en México solo un 2.5 %. En energías renovables un 13.57 % a nivel mundial y a nivel nacional un 6.75 % se muestra en la Imagen 1-5.

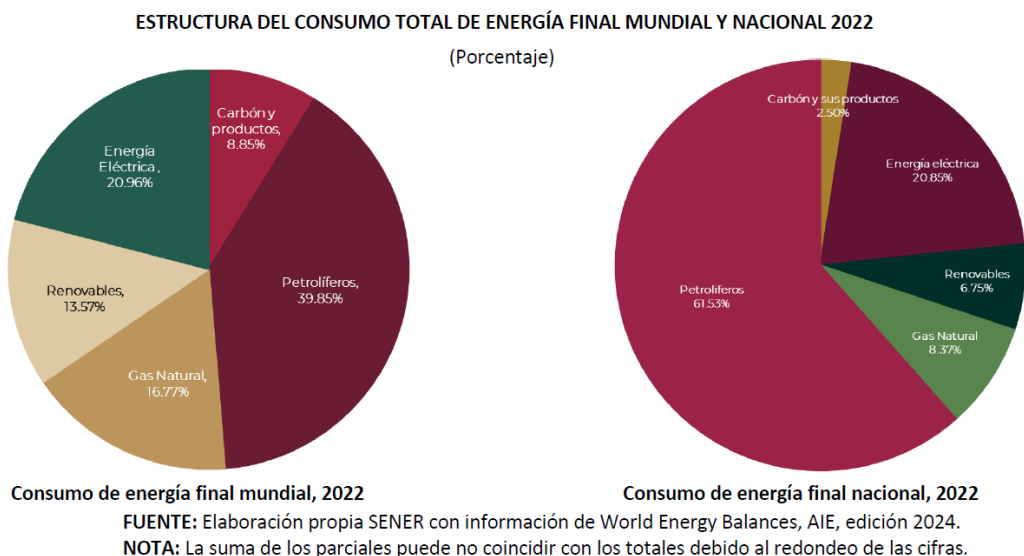


Imagen 1-5. Comparativa de consumo energético a nivel mundial vs nacional.

En resumen, México sigue siendo un país productor de petróleo principalmente, sin embargo, es rescatable que en cuanto a producción de energía con recursos renovables se mantiene un porcentaje muy parecido al promedio mundial. Otro punto a favor es la producción con carbón que es mínima y muy por debajo del promedio mundial.

Acorde a la perspectiva energética entre el 2030 y 2050 el uso de la energía eléctrica tendrá un preponderancia mayoritaria y al menos hasta el 2022, México mantiene un promedio similar al del resto del mundo, pero con la diferencia de que el uso de energías renovables está aún muy por debajo del promedio mundial. Esto quiere decir que la producción de energía eléctrica aún tiene un reto importante para ser generada con energías renovables para lograr los objetivos propuestos.

Las políticas energéticas no solo tienen que tomar en cuenta el tipo de energéticos que serán producidos y consumidos en los siguientes años, sino la soberanía energética que eso va a implicar. Según el mismo informe (Secretaría de Energía, México, 2023), la nación no es autosuficiente en la generación de energía que el consumo demanda, estando en un índice de 0.85 siendo el ideal mayor a 1.0. Esto significa que también se debe considerar una menor dependencia extranjera en los próximos años, ya que “para satisfacer las necesidades energéticas internas, se recurrió a importaciones de insumos energéticos

(4,556.76 PJ)” en el año 2023, esto es 5.45 % más que en año 2022 “principalmente en gas, gasolinas y naftas.” (Secretaría de Energía, México, 2023)

Otro factor por considerar es que la transición energética de la dependencia de hidrocarburos a energías limpias no será inmediata, si no que será necesaria una inversión considerable a energías de transición como con el gas y los bioenergéticos.

Actualmente la generación eléctrica en México se distribuye de la siguiente manera:

- Combustibles fósiles convencionales: 75.67 %
- Solar fotovoltaica: 6.64 %
- Hidroeléctrica: 5.86 %
- Eléctrica: 5.89 %
- Nucleoeléctrica: 3.42 %
- Otros: 2.52 %

Lo que confirma que hay una dependencia muy grande de la energía eléctrica producida con combustibles fósiles convencionales.

El “Programa de Desarrollo de Sistema Eléctrico Nacional, 2023-2037” da varias pautas internacionales para que lo anterior cambie radicalmente en la próxima década, entre ellas se nombran:

1. La Declaración Universal de los Derechos Humanos, donde se estipula “el derecho de toda persona a un nivel de vida adecuado para sí y su familia, incluso alimentación, vestido y vivienda adecuados y a una mejora continua de las condiciones de existencia” (PRODESEN, Secretaría de Energía, SENER, 2023).
2. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que desde el año 1994 que entró en vigor ha sido ratificada por México y otros 195 países y que menciona: “asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.” (PRODESEN, Secretaría de Energía, SENER, 2023)
3. Acuerdo de París, donde se acuerda tomar las medidas necesarias para limitar el incremento de temperatura global no mayor a 1.5°C, este acuerdo entro en vigor en México el 4 de noviembre del año 2016 y sigue vigente.
4. Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, donde en “El Objetivo 7 se refiere a Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna” (PRODESEN, Secretaría de Energía, SENER, 2023)

Entre todos los criterios de planeación que el programa define, para los objetivos del presente trabajo hacemos énfasis en: “(la planeación) ..garantizará la participación en la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables en las comunidades rurales de alta marginación y rezago.” (PRODESEN, Secretaría de Energía, SENER, 2023) y estas fuentes las define como aquellas generadas por plantas hidroeléctricas fotovoltaicas,

eololéctricas, geotermoeléctricas y la generación de plantas eléctricas que utilizan bioenergéticos, obtenidos a partir de la biomasa, el bagazo de caña, el licor negro, entre otros.

Basado en este objetivo es posible justificar una investigación amplia y detallada para que parte de la transición energética sea a través de bioenergéticos, que como pudo leerse hay un campo amplio de aplicación dentro de la gama de producción y consumo mundial.

1.2.1 Bioenergía, situación nacional.

Según la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB) publicada el 1 de febrero del año 2008, los Bioenergéticos los define como: “Combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades, agrícola, pecuaria, silvícola, acuacultura, algacultura, residuos de la pesca, domesticas, comerciales, industriales, de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos, por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad competente ...” (CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, Nueva Ley DOF 01-02-2008, 2008)

Esta ley fue vigente durante diecisiete años y el 18 de marzo del 2025 con la publicación de la “Ley de Biocombustibles” y su abrogación la definición se dividió en dos:

- “Biocombustible: Los combustibles gaseosos, líquidos o sólidos producidos a partir del aprovechamiento energético directo de la biomasa o los obtenidos a partir de su procesamiento. No se consideran las mezclas de Biocombustibles con petrolíferos como Biocombustible.”.
- “Biomasa: La materia renovable de origen orgánico cuyo contenido energético es susceptible de ser aprovechado como Biocombustible. Se excluye a la materia de origen orgánico contenida en yacimientos y formaciones geológicas fosilizadas conocida como hidrocarburos”.

(CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, Nueva Ley DOF 18-03-2025, 2025)

Se menciona que en México se utilizan dos biocombustibles principalmente para la generación de energía eléctrica: la biomasa y el biogás, cabe mencionar que este último ya no se define, ni se menciona en la Ley del 2025. Sin embargo, el biogás entre el año 2005 al 2015 aumentó su capacidad instalada de 19.3 MW a 80 MW, esto es un incremento de 4 veces más en solo una década. En el caso de la biomasa para la generación eléctrica principalmente proviene del bagazo de caña, en este caso la capacidad instalada aumentó de 66.6 MW a 599.1 MW en el mismo periodo. (Secretaría de Energía, SENER, 2016)

Entre los años 2019 y 2022, la capacidad instalada conectada de generación de electricidad por medio de Bioenergéticos con la red nacional de distribución eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad pasó de 375 MW a 408 MW en el año 2022, en su totalidad de compañías de origen privado, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Capacidad instalada en México.

CAPACIDAD INSTALADA INTERCONECTADA DE LA CFE Y DEL RESTO DE LOS PERMISIONARIOS (MW), SE EXCLUYEN CENTRALES EN PRUEBAS

TECNOLOGÍA	2019	2020 ^{1/}	2021 ^{6/}	2022 ^{2/}
Hidroeléctrica	12,612	12,612	12,614	12,613
Geotermoeléctrica	899	951	976	976
Eoloeléctrica	6,050	6,504	6,977	6,921
Fotovoltaica	3,646	5,149	5,955	6,535
Bioenergía ^{2/}	375	378	378	408

De ese total se distribuye de la siguiente manera, el detalle se muestra en la Tabla 2:

- 47.54 % es para cogeneración,
- 21.81 % Usos propios continuos,
- 20.58 % Generación diversa,
- 10.05 % Para autoabastecimiento.

Tabla 2. Capacidad instalada por modalidad y tipo de tecnología.

CAPACIDAD INSTALADA INTERCONECTADA A LA RED POR MODALIDAD Y TIPO DE TECNOLOGÍA DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (MW), AL 31 DE DICIEMBRE DE 2022^{1/}, EXCLUYE CENTRALES EN PRUEBAS

TECNOLOGÍA	AUTO ABASTECIMIENTO	COGENERACIÓN	GENERACIÓN ^{2/}	GENERACIÓN CFE	PEQUEÑA PRODUCCIÓN	PRODUCCIÓN INDEPENDIENTE	USOS PROPIOS CONTINUOS	TOTAL
Hidroeléctrica	196		278	12,125	14			12,613
Geotermoeléctrica	25		0	951				976
Eoloeléctrica	4,172		2,048	86	2	613		6,921
Fotovoltaica	497		5,912	6	100			6,515
Bioenergía ^{3/}	41	194	84				89	408
Híbrido FV-Batería			20					20

Según lo publicado en el Programa del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037, SENER, la generación de energía eléctrica en el año 2018 paso de 313,978.24 GWh a 340,712.75 GWh en el año 2022, de estos en el 2018 el 22.5 % fueron producción de energías limpias y para el año 2022 se incrementó a un 31.2 %. De este último valor la mayor cantidad fue

producido por hidroeléctricas con un 42.85 % para el año 2022 y solo un 2.58 % con bioenergéticos, se muestra en la Imagen 1-6.

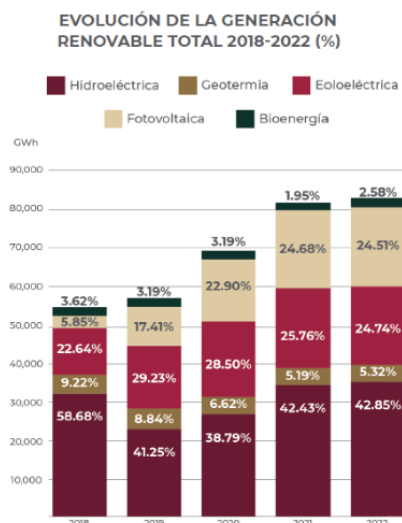


Imagen 1-6. Evolución de generación de energía renovables.

Dentro de los bioenergéticos la producción de energía con gabazo de caña liderea con el 89.58 % mientras que en menor la biomasa proporción solo genera 0.312 % junto con Generación Distribuida¹ como se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Generación de bioenergía 2018-2022

GENERACIÓN DE BIOENERGÍA TOTAL 2018-2022 (GWH) Y PORCENTAJE RESPECTO A LA GENERACIÓN TOTAL					
TECNOLOGÍA/ FUENTE DE ENERGÍA	2018	2019	2020	2021	2022
Bioenergía Total	1,989.2	1,866.5	2,206.5	1,595.6	2,141.3
Porcentaje respecto al Total	0.63%	0.58%	0.70%	0.49%	0.63%
Bagazo de Caña	1,578.8	1,476.3	1,583.2	1,374.1	1,918.2
Biogás	213.3	241.2	526.7	176.1	153.8
Biogás - Generación Distribuida					38.9
Relleno Sanitario	125.6	110.9	67.4	16.2	
Licor Negro	71.4	38.1	26.4	24.8	23.7
Biomasa	0.0	0.0	2.8	4.3	3.4
Biomasa - Generación Distribuida					3.3

¹ El artículo 3, fracción XXIII de la LIE define a la Generación Distribuida como: "Generación de energía eléctrica que cumple con las siguientes características: a) Se realiza por un Generador Exento en los términos de esta Ley, y b) Se realiza en una Central Eléctrica que se encuentra interconectada a un circuito de distribución que contenga una alta concentración de Centros de Carga, en los términos de las Reglas del Mercado;"

1.2.2 Bioetanol en México.

La institución que lidera y regula la política energética del país es la Secretaría de Energía (SENER). Para el campo específico de investigación en energías renovables ha creado los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIEs) que son "...agrupaciones de centros de investigación públicos o privados, instituciones de educación superior, empresas y entidades gubernamentales que tienen el objetivo de trabajar en conjunto sobre proyectos dedicados a desarrollar tecnologías, productos y servicios, que permitan a nuestro país aprovechar su enorme potencial en las principales energías renovables." (Secretaría de Energía, SENER, 2015). Su organización se ha clasificado en:

- CEMIE Bio.
- CEMIE Eólico.
- CEMIE Geo.
- CEMIE Océano.
- CEMIE Sol.

El CEMIE Bio es el encargado específicamente de la investigación de biocombustibles, entre los que se pueden nombrar etanol, biocombustibles sólidos, biodiesel, bioturbosina y biocombustibles gaseosos como biogás e hidrógeno. Uno de sus objetivos es lograr que para el año 2027 el 30 % de la energía producida en el país debe generarse con energías renovables. De este porcentaje se tiene el reto de que el 5 % de generación de electricidad sea con metano e hidrógeno derivados de la biomasa residual.

En México la principal materia prima para producir bioetanol es la caña de azúcar. La riqueza de su contenido en celulosa y la extensa investigación de su uso como biocombustible hacen una planta idónea para la producción de este energético, junto con otras características que la hacen viable:

- Excedentes. Su producción en México no impacta considerablemente en otros rubros como la alimentación humana.
- Eficiencia. El alto rendimiento de bioetanol producido hace una eficiencia óptima para su explotación.
- Legislación aprobada. Desde el año 2005 ya se cuenta con una ley que regula su aprovechamiento como energético.

Según la norma NOM-016-CRE-2016 permite que los biocombustibles se mezclen hasta en un 5.8 % con gasolina para que funcione como oxigenante. Se estima que "la capacidad nacional de producción de bioetanol para mezcla con gasolina para el año 2020 por parte de los ingenios azucareros fue de 462 – 789 millones litros al año (ML/A); y los proyectos independientes aportarían con una producción de 370.8 ML/A" muy por debajo de la

producción requerida de 4,370.6 ML/A considerando una mezcla al 10 % del volumen de gasolina. (Instituto Mexicano del Petróleo, 2017). Si sumamos la producción máxima con el aporte de proyectos independientes tendríamos idealmente una producción de 1,159.80 ML/A, esto es un déficit de más del 73 % del requerido.

En el año 2017, se otorgaron permisos a 7 empresas para producción de bioenergéticos, 6 para producción de etanol anhidro y 1 para biodiesel. En el año 2024 la configuración cambio a 5 para etanol anhidro y 2 para biogás. En este mismo año se tiene registro de 14 comercializadoras de biocombustibles autorizadas por la SENER. Esta diferencia de la cantidad de comercializadoras vs productoras va acorde con la NOM-016-CRE-2016, donde por el déficit de producción se permite la exportación de gasolinas que contengan el 5.8 % de etanol como oxigenante máximo. (CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, Nueva Ley DOF 18-03-2025, 2025)

En síntesis, podemos observar que el uso de la biomasa como una alternativa para la generación de energía en México no está teniendo un papel relevante. Acorde con la perspectiva de generación de energía para las siguientes décadas, donde todos los estudios plantean que la energía eléctrica será la preponderante, se plantea que su generación sea a través de hidroeléctricas, campos fotovoltaicos y eólicos, sin embargo, la transición energética plantea que antes de llegar a esa preponderancia, energías producidas con la biomasa serán parte del puente que vincule la eliminación de hidrocarburos con la dependencia mayoritaria de energías limpias.

Los números muestran que la poca producción de energía con base a biomasa, dan un campo de oportunidad para que la investigación aumente su producción, ya que se tiene materia prima que actualmente es desechada o poco aprovechada para este fin.

1.3 Biomasa

Se dice que la gran mayoría de la energía almacenada en la tierra ha venido del sol y la seguirá proveyendo de ese recurso durante varios milenios más. Dicha energía ha sido procesada para beneficio humano de diferentes formas a lo largo del tiempo. Su transformación y aprovechamiento han sido más eficientes debido al conocimiento cada vez más detallado de la química orgánica y el avance tecnológico aplicado a la misma.

Los enlaces que el carbono logra con relativa facilidad con elementos como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, entre otros, suelen formar reacciones químicas que liberan grandes cantidades de energía con costes pequeños. Esta energía es la que se ha aprovechado y mejorado conforme la tecnología ha avanzado. Cuando se estudió y entendió la capacidad energética de estos elementos, los compuestos químicos formados por carbono e hidrógeno, llamados hidrocarburos, cobraron una relevancia considerable y hicieron la fuente energética principal del siglo XX. De forma relativamente barata se pudo disponer de energía ilimitada, o al menos con esa idea se jugó hasta que el mundo conoció las crisis energéticas que hubo durante las últimas décadas del mismo siglo. Tomó mayor relevancia entonces los conceptos de: “Energías renovables” y “Energías no renovables”.

El desarrollo de la tecnología entonces se orientó hacia alternativas que pudieran a futuro sustituir esos recursos: se focalizó la investigación hacia fuentes energéticas renovables, esto es fuentes de energía que no tengan los mismos problemas que los hidrocarburos como: escases, generación de distintos tipos de contaminantes, afectaciones directas o indirectas al ser humano y al equilibrio natural, entre muchos otros.

La energía solar y eólica han sido los principales actores en la nueva forma de generación energética por considerarse que son las que mejor cumplen con las características descritas. Sin embargo, aún están lejos de poder sustituir toda la demanda presente y sobre todo futura, por ello como parte de las investigaciones realizadas para la obtención de energía y al mismo tiempo lograr un mínimo de afectación al equilibrio natural se puso un foco especial en la biomasa como parte de la transición energética.

La biomasa se define como toda materia orgánica, esto es materia que contiene los principales elementos al principio mencionados, carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno que junto con otros puede ser aprovechada energéticamente. Esta definición es general y puede aplicarse tanto a un origen animal o vegetal y dan origen al concepto de biocombustibles, esto es, biomasa para ser usada como materia prima para la producción de energéticos.

1.3.1 Clasificación de la biomasa

Las diferentes clasificaciones que se han asignado a la biomasa (Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, 2025) son:

- Por su estado de agregación.
- Por su origen.
- Por su composición.

1.3.1.1 *Clasificación por estado de Agregación.*

Por su estado de agregación la clasificación se divide en estado sólido, líquido o gaseoso. La biomasa sólida quizás más utilizada desde la prehistoria ha sido la leña, su combustión ha sido utilizada principalmente para generar el calor suficiente para la cocción de alimentos y templar el medio ambiente a temperaturas que ha permitido sobrevivir a la especie humana. Posteriormente la tecnología permitió que se utilizara de forma indirecta para aprovechar la energía generada al convertir el agua líquida a vapor. Esto fue un gran salto ya que su aprovechamiento energético permitió generar la potencia suficientemente grande para mover masas a gran escala, con ello la historia de la humanidad tuvo otro punto de inflexión tecnológico. De tal forma que la gran mayoría de la biomasa sólida es utilizada como combustible pero ya no solo como leña, si no como materia prima proveniente de residuos tanto industriales como naturales que son procesados para crear astillas, pellets o carbón vegetal.

En el caso de la biomasa que puede ser transformada a un estado gaseoso, se encuentran el biogás y el hidrógeno. El biogás por lo general se produce por la degradación de la materia orgánica de forma anaerobia, por lo general en una mezcla de metano y dióxido de carbono. Las principales fuentes de este biocombustible son los vertederos de basura y en zonas donde la producción de ganado puede aportar el estiércol suficiente para su producción.

La biomasa líquida se refiere principalmente a la generación de bioetanol y biodiesel. Su materia prima se basa en residuos industriales, residuos agrícolas, aunque en países como Brasil existe una industria agrícola especializada para la generación de estos subproductos. Ambos basan su contenido energético en la generación de alcohol a través de la fermentación de sus azúcares con levaduras y bacterias especializadas. En el caso del biodiesel al alcohol generado se le agrega “aceite, y se somete a reactores de esterificación y transesterificación, un acondicionamiento y una separación de sales.” (Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, 2025)

1.3.1.2 Clasificación por su origen.

La clasificación por su origen puede ser natural, residual o cultivo energético. En el caso natural, se refiere a aquella que no ha requerido intervención humana para su generación, en este rubro se tiene la leña, ramas secas, hojas caídas, resto de poda de árboles, y hojarasca en general. Estos pueden ser transformados en pellets, astillas, briquetas y en el caso de cáscaras pueden ser trituradas y aprovechadas para este fin.

En el caso de los compuestos residuales pueden ser de forma sólida o líquida y se refiere a desechos generados por actividad humana. En esta categoría se asignan los residuos urbanos, residuos agrícolas, ganaderas y silvicultura.

En el caso de cultivo energético también se le conoce como “Producida o Generada” ya que se refiere a la producción de cultivos especializados dedicados a la generación de biocombustibles. En este apartado se puede incluir el maíz y la caña de azúcar.

1.3.1.3 Clasificación por su composición.

Se refiere a la clasificación por su composición química, estas pueden ser lignocelulósica, oleaginosa, amilácea/alcohólica y residuos orgánicos. En el caso de la biomasa lignocelulósica, se refiere a aquella que está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es un polisacárido, se encuentra en las paredes celulares vegetales y se dice que es el polímero más abundante en la naturaleza. La hemicelulosa “es una mezcla de diversos azúcares como xilosa, manosa, glucosa y ácidos urónicos producidos en la masa vegetal” también se encuentra en las paredes celulares, pero no es tan abundante como la celulosa. La lignina, también está formada por polímeros y es la segundo más abundante en la tierra después de la celulosa, su objetivo principal es dar rigidez estructural, impermeabilidad y resistencia a la oxidación y ataques microbianos. (Cortes, 2014)

La oleaginosa se refiere a la biomasa que se le puede extraer de sus frutos o semillas acetites principalmente para producción de biodiesel, por lo general se incluye la soja, la canola, el cártamo, palma y el girasol.

La biomasa amilácea o alcohólica y de residuos orgánicos se refiere a aquella que se utiliza para la producción de alcohol etílico o etanol. Se basa en la fermentación de azúcares como glucosa, fluctuosa y sacarosa, utilizando microorganismos como levaduras o bacterias específicas para tal uso. La materia prima utilizada en esta clasificación viene principalmente de productos vegetales ricos en uno o varios de estos azúcares como el maíz y la caña de azúcar. En los últimos años se ha investigado más a fondo de la producción de bioetanol por medio de desechos orgánicos como cascara de frutas o cualquier otra planta que mejore la eficiencia del uso de maíz y caña de azúcar, ya que estas tienen inconvenientes sociales, ecológicos y energéticos que ponen en duda su efectividad para producción en grandes cantidades a futuro.

1.4 Biocombustibles

Los biocombustibles son aquellos compuestos que pueden ser aprovechables energéticamente cuya materia prima principal es la biomasa. Se dice que son “biocarburantes como alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos que provienen de compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa) extraída de plantas silvestres o de cultivo, que sustituyen en mayor o en menor parte el uso de la gasolina en el transporte o destinados a producir electricidad.” (Salinas & E., 2009)

Como se describió al principio de este capítulo la bioenergía jugará un papel relevante en la transición energética para la eliminación o reducción al mínimo del uso de hidrocarburos como fuentes principales de energía. Parte de esta bioenergía se apoya en biocombustibles y estos a su vez en la biomasa para optimizar los procesos de producción energética. Una de las ventajas del uso de biocombustibles es la contaminación mínima que se genera en su combustión, así como ser considerados como energías renovables.

Las investigaciones realizadas durante el último siglo, principalmente en el último tercio, se han centrado en el uso de maíz, caña de azúcar y soja para la generación de biocombustibles líquidos, ya que ofrecen rendimientos aceptables. Sin embargo, es cuestionable si la producción de estas materias primas debe priorizar la alimentación o la energía. Por ello los investigadores en esta materia se han dado a la tarea de hacer más eficiente la producción y al mismo tiempo buscar alternativas que no alteren el equilibrio socioeconómico mundial. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Buenos Aires, Argentina., 2019) (Vargas y otros, 2022) (Universidad de Sevilla, 2006)

1.4.1 Generaciones de biocombustibles. Ventajas y desventajas.

Primera Generación. Se dice que un producto final bioenergético es de primera generación cuando la biomasa utilizada para su producción fue de cultivos agrícolas, grasas animales, aceites vegetales. Algunas ventajas es que la obtención de materia prima es relativamente fácil y la tecnología para la generación de productos como biodiesel o bioetanol no es muy complicada. Del mismo modo pueden adaptarse a sistemas energéticos actualmente en uso, por ejemplo, al combinarse con gasolinas y con ello minimizar los contaminantes generados al quemarse. Los cultivos más utilizados en esta clasificación son el maíz, la caña de azúcar, la soja y en menor medida algunos cereales como trigo o cebada, o algunos ricos en sacarosa como la remolacha o sorgo. Sin embargo, al ser productos que forman

parte de la alimentación humana, tienden a disminuir su efectividad socioeconómica, ya que el cultivo de estos productos para la producción de biocombustibles puede entrar en conflicto con el destinado a alimentación, y en muchos casos, no es lo suficientemente eficiente para cubrir tanto la parte energética como la alimentaria. Otro gran problema es el uso de agua dedicada para este fin, ya que es un recurso que no está completamente disponible en muchas partes del planeta, por lo tanto, no son procesos universales, esto es, no se pueden aplicar los mismos métodos de producción de biocombustibles en cualquier parte del mundo.

Segunda Generación. Los biocombustibles de segunda generación tratan de resolver los problemas de la primera, esto es, no utilizan cultivos que impacten en la alimentación humana, sino elementos naturales que no tengan relevancia para el consumo humano y también los residuos agrícolas y los residuos urbanos. Por ejemplo, casos en los que puede aprovecharse biomasa rica en celulosa como los aserraderos, los desperdicios de las empresas de muebles de madera o cualquier residuo industrial maderable. En otro rubro, pero también ricos en celulosa, se encuentran el uso de cascarás de nueces, cacahuates o pistaches, principalmente convertidas en pellets y utilizadas como combustibles en estufas o calderas. En la segunda generación también entra la hojarasca o el bagazo de la caña y últimamente se ha investigado en la obtención de biocombustibles como bioetanol y biodiesel con desechos que se pueden encontrar en mercados tanto mayoristas como minoristas como cascaras de naranja, de plátano, de mango o cualquier desecho vegetal urbano que se genere en grandes cantidades. Todos estos ejemplos, tienen la ventaja de no competir con cultivos cuya función principal es alimentaria, en algunos, pueden ser producidos en lugares no dedicados a ellos, incluso pueden servir para focalizar la atención en plantas no protegidas como es el caso de la presente investigación. El uso de pesticidas y fertilizantes también se reducen a un mínimo y la huella energética utilizado para esta materia prima es mínima o casi nula, ya que la mayoría ya son desechos, aumentando considerablemente su eficiencia.

Las desventajas de la generación de biocombustibles de esta generación es el alto costo de producción comparado con los combustibles fósiles, la tecnología para la creación de biocombustibles aún está en desarrollo y su producción por tonelada de materia prima aún es muy baja. Al ser productos dedicados a la combustión siguen generando gases de efecto invernadero (GEI), aunque en menor medida como con los combustibles fósiles, sin embargo, están aún presentes, mientras que con tecnologías como solar o eólica son minimizados.

Tercera y Cuarta Generación. Al igual que el caso anterior, estas generaciones tratan de minimizar los problemas de la generación que le antecede. En los párrafos anteriores se destacó que uno de los grandes problemas de la generación de biocombustible de primera y segunda generación es la poca producción de producto final, esto es por cada tonelada de materia prima la producción, en el caso de bioetanol, se encuentra alrededor de los 400

litros utilizando maíz, y esta cantidad va disminuyendo significativamente con el resto de la biomasa, sin embargo, hay que considerar las desventajas ya vistas en cada una de ellas. (CARDONA y otros, 2005)

Estas nuevas generaciones tratan de utilizar organismos modificados genéticamente para que el proceso sea más eficiente, un mejor pretratamiento, aumentar la cantidad de azúcares como celulosa o glucosa, otro ejemplo serían árboles con menor cantidad de lignina y mayor cantidad de celulosa o plantas con mayor capacidad para captar CO₂, uso de algas y microalgas para la generación de bioetanol. Estas últimas pueden ser cultivadas con procesos específicos para producción de biodiesel y cumplen con el objetivo de no ser materias primas que tengan un impacto en la alimentación humana, al poder obtener carbonos e hidrógenos de manera abundante pueden ser una opción viable a futuro para la creación de biocombustibles.

1.5 Generalidades del mezquite.

La diversidad natural de México ha sido indiscutiblemente reconocida a nivel mundial por la importancia que esta aporta a los ecosistemas y al valor cultural, alimenticio y medicinal. Entre la flora más destacada a nivel local existen algunas que sobresalen por ser extremófilas como los diferentes tipos de agave o para el caso que nos compete: “El árbol de mezquite”, ambas plantas extraordinarias.

El mote se le ha asignado por su capacidad de supervivencia en condiciones agrestes que pocas plantas poseen. Es resistente a heladas, a calores intensos, se llega a encontrar en regiones hasta 2,200 metros sobre nivel del mar, necesita pocos cuidados y sobre todo tiene un bajo consumo de agua.

Los mezquites son árboles que se encuentran en zonas áridas y semidesérticas principalmente en el continente americano ya que, de las 44 especies clasificadas, 42 de ellas se extienden en zonas de norte y sur de América. (Rodríguez Saucedo y otros, 2014)

Las distribuciones geográficas pueden apreciarse en las imágenes 1-7 a 1-10. (Rzedowski, 1988)

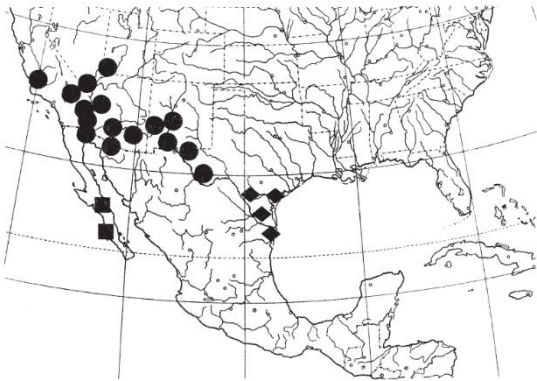


Imagen 1-7. Distribución de *Prosopis* en suroeste de Estados Unidos

En el suroeste de Estados Unidos se encuentran las especies *Prosopis Palmeri* y *Prosopis pubescens*.

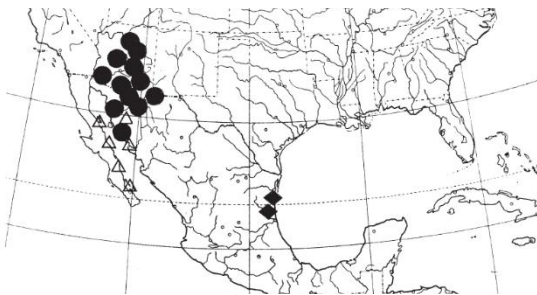


Imagen 1-8. Distribución de *Prosopis* noroeste de México.

Más concentrada en el mismo cuadrante se tiene la variedad *Prosopis articulata* y en la zona Noroeste la *Prosopis tamaulipana*.

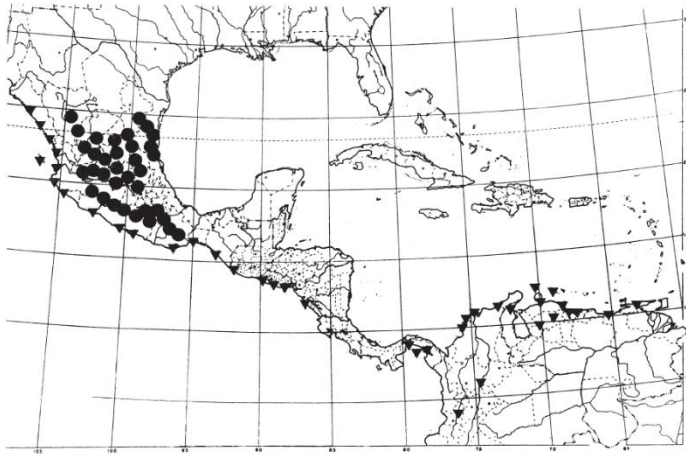


Imagen 1-9. Distribución de *Prosopis* en Norteamérica y Centroamérica de *Prosopis laevigata*.

La variedad *Prosopis laevigata* domina el centro y norte del país, mientras que la *Prosopis juliflora* se localiza más en la zona ecuatorial del continente americano.



Imagen 1-10. Distribución *Prosopis globosum* y *reptans* en Suramérica.

Prosopis globosum y *P. reptans* son las que dominan el sur del continente. Se encuentran principalmente en Chile, Argentina y Perú.

En resumen, las especies arbóreas de *Prosopis* en México son:

- *Prosopis juliflora*.
- *Prosopis pubescens*.
- *Prosopis palmeri*.
- *Prosopis articulata*.
- *Prosopis tamaulipana*.
- *Prosopis laevigata*.
- *Prosopis glandulosa*.
- *Prosopis glandulosa* var. *torreyana*.
- *Prosopis velutina*.

En el presente trabajo se centrará en la variedad *laevigata*.

Su taxonomía es la siguiente (Rodríguez Saucedo y otros, 2014):

Nombre Científico: *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M.C. Johnston.

- Reino: Plantae
- División: Magnoliophyta
- Clase: Magnoliopsida (Dicotiledoneas)
- Subclase: Rosidae
- Orden: Fabales
- Familia: Fabaceae
- Género: *Prosopis*

Entre las características más destacables de este árbol podemos listar las siguientes:

- Se le conoce también con el nombre de: útuh, chúcata, tiritzecua y algarrobo.
- La altura ronda hasta los 15 m.
- Los usos principales de la planta son:
 - Dendroenergético. Para calefacción y carbón vegetal.
 - Madera. Para uso de muebles,
 - Frutos. Son usados como forraje para ganado doméstico y productos alimenticios.
 - Fuente de alimento en granjas apícolas para la producción de miel.
 - Mejora la calidad del suelo.
 - Algunas especies producen una resina que es usada como dulces, en algunos casos para pegamentos y barnices y casos farmacéuticos.
- La variedad de mezquite laevigata es la de mayor distribución en el territorio mexicano. (Rodríguez Saucedo y otros, 2014)
- “Las hojas son compuestas, bipinnadas con 12 a 15 pares de folíolos oblongos o lineares, de 5 a 10 mm de largo. Las flores son de color amarillo verdoso, agrupado en racimos, miden de 4 a 10 mm, son bisexuales, actinomorfas, con 5 sépalos y 10 estambres. El fruto es una vaina de color paja o rojizo violáceo; con forma de lomento drupáceo, alargado, recto o arqueado y espiralado en algunos casos, indehisciente, de 10 a 30 cm de longitud, puede ser plano o cilíndrico en la madurez y contiene de 12 a 20 semillas. (Rodríguez Saucedo y otros, 2014).

Estudios bioquímicos de hojas, flor y fruto de la variedad *Prosopis laevigata* muestran que (García-Azpeitia y otros, 2022):

- “Los frutos en estado de madurez tienen mayor contenido de antocianinas ya que se observó mayor pigmentación de colores púrpura en el pericarpio de los frutos, pigmentación que se degrada en la senescencia, tomando un color amarillo pálido...”

- “El mayor contenido de proteínas, grasas, cenizas y carbohidratos en la flor, se atribuye a que en este órgano se concentra el mayor contenido de nutrientes debido que son utilizados para el desarrollo del fruto.”
- “La cantidad de fibra cruda encontrada en el fruto ... contiene entre 7.73 y 54.4 g/100 g base seca.”
- “Es de resaltar que la hoja, flor y fruto de *Prosopis laevigata* son ricos en carbohidratos y proteínas.”
- “El fruto podría incluirse en la dieta como fuente de fibra dietética, así como por las propiedades de bajo índice glucémico del exomesocarpo (Peña-Avelino et al. 2014); también, podría usarse en la formulación de productos de panificación, como otras leguminosas ricas en proteínas (González-Montemayor et al. 2019).
- “En la flor se encontró el mayor contenido de compuestos fenólicos y alcaloides.”
- “El contenido de nutrientes, minerales y fitoquímicos permite concluir que esta especie puede constituir una fuente de metabolitos primarios, minerales y compuestos funcionales para el consumo humano o animal y para la obtención de subproductos.” (García-Azpeitia y otros, 2022).
- Cada árbol puede producir en promedio entre 50 a 80 kg de vaina de mezquite de forma anualizada y en algunos casos hasta 100 kg. (Rossana del Carmen, 2020)
- Se calcula que en el estado de Hidalgo hay 83 437 hectáreas potenciales donde los árboles de mezquite y en especial la especie *Prosopis laevigata* puede ser establecida (Palacios y otros, 2021). El estado de hidalgo cuenta con un total de 2.1 millones de hectáreas aproximadamente, por lo tanto, esta área representa el 3.97 % del total.
- En general no existen plantíos especializados de mezquite donde se aproveche el área total para siembra de esta planta, en promedio se calcula que en una densidad baja se pueden encontrar hasta 100 árboles por hectárea y en una densidad alta 250 en promedio.
- Esto nos da un total de 8,343,700 de árboles potencialmente utilizables en la región de Hidalgo para su aprovechamiento considerando una densidad baja.

2 Marco teórico

“Una de las principales fuentes de hexosas y pentosas es sin duda, la biomasa de tipo lignocelulósico proveniente principalmente de residuos agrícolas, dado a su elevado contenido de celulosa y hemicelulosa. No obstante, lograr el fraccionamiento de esta biomasa para tener los anhelados polímeros de celulosa y hemicelulosa es un trabajo muy complejo, dado que el elevado contenido de lignina presente impide la separación de los polisacáridos para su posterior hidrólisis, por lo cual es necesario emplear tratamientos físicos, químicos, biológicos o la combinación de estos, lo suficientemente fuertes para que permitan la separación de los polímeros pero sin generar reacciones secundarias de estos azúcares en productos indeseados.” (Cortes, 2014)

En el capítulo presente se desarrollará el marco teórico para la obtención de un biocombustible centrándose en el bioetanol.

2.1 Características generales del etanol y su uso como biocombustible.

El etanol es un líquido incoloro, transparente, con olor característico, miscible al agua, éter, metanol, cloroformo y acetona, volátil e inflamable, esto es, sus vapores pueden generar mezclas explosivas e inflamables con el aire a temperatura ambiente. Se obtiene principalmente por fermentación de azúcares y por síntesis a partir de etileno. Algunas de sus características químicas y termodinámicas son las siguientes: (Facultad de Química, UNAM., 2008)

Nombres comunes: Alcohol, Alcohol Etílico, Etanol, Alcohol Anhidro, Hidrato de Etilo.

- Fórmula: C_2H_6O o C_2H_5OH .
- Estructura: CH_3CH_2OH .
- Peso molecular: 46.068 g/mol.
- Composición: C: 52.24 %;
- H: 13.13 %,
- O: 34.73 %.
- Punto de ebullición: 78.3°C.
- Punto de fusión: -130 °C.
- Densidad: 0.7892 a 20 °C.
- Índice de refracción: 1.361 a 20 °C.
- Punto de congelación: -114.1 °C.
- Calor específico: 2.42 (J/g °C) a 20 °C.

- Conductividad térmica: 0.17(W/m K) a 20 °C.
- Densidad energética/Poder Calorífico: 27 MJ/kg.
- Inflamación del etanol puede verse en la Tabla 4.

Tabla 4. Punto de inflamación del etanol.

Porcentaje de pureza %	Temperatura °C	Porcentaje de pureza %	Temperatura °C
100	12	40	26
96	17	30	29
80	20	20	36
70	21	10	49
60	22	5	62
50	24		

Su capacidad energética, su relativa facilidad de obtención y su contribución a reducir las emisiones de GEI han hecho que este combustible muy popular como parte de la demanda energética mundial.

Investigaciones han demostrado que puede reducir entre un 39 % hasta un potencial de 70 % los GEI, según la Renewable Fuels Association (RFA) “en el año 2024 el uso de etanol en gasolinas redujo 54.3 millones de toneladas métricas de GEI lo que equivale a retirar de circulación 12 millones de carros por un año o eliminar las emisiones anuales de 14 centrales eléctricas de carbón o eliminar las emisiones de 313,000 vuelos de ida y vuelta de Los Ángeles a Nueva York”.

Prácticamente el 80 % de la producción de etanol es producido entre Estados Unidos y Brasil con una producción anual de 16,219 Mil. Gal. (61,395,593.725 l) y 8,780 Mil. Gal (33,235,915.46 l) respectivamente. (Renewable Fuels Association , 2024)

Las materias primas utilizadas para su producción son: almidón de maíz, caña de azúcar y sorgo, pero puede usarse cualquier materia vegetal donde su componente “celulósico” pueda ser transformado en etanol de forma práctica. En la presente investigación se utilizó vaina de mezquite como materia prima para la producción de etanol, lograr un menor consumo de agua durante el proceso y reducir significativamente los problemas asociados a su producción con las materias primas tradicionales ya mencionadas.

2.2 Producción de bioetanol.

La biomasa en general puede ser utilizada como materia prima de diferentes sustancias químicas que son valoradas a nivel comercial como bioplásticos y productos farmacéuticos como glicerina, ácido 2,5-furandicarboxílico, ácido acético, ácido láctico, algunas vitaminas entre otros muchos productos. (Universidad de Sevilla, 2006), En nuestro caso nos enfocaremos a su uso energético como biocombustible.

La biomasa lignocelulósica se refiere a aquella que es rica en ese material y el cual consiste en tres tipos diferentes de polímeros: celulosa ((C₆H₁₀O₅)_n), hemicelulosa o almidón (polisacáridos) y lignina (polímeros). Como se mencionó en un principio estos tres polímeros son abundante en la naturaleza y entre otras propiedades tienen la función de darle estructura a la planta y rigidez, principalmente la lignina que le da resistencia microbiana e impermeabilidad. Esta rigidez dada por el conjunto de celulosa – hemicelulosa – lignina hacen complicada tratamientos directos para aprovechar sus carbonos, hidrógenos y oxígenos en algo deseado. Para ello es necesario realizar alguno o varios pretratamientos para romper dicha estructura, figura 2-1 y poder aplicar algún proceso para la obtención de la cadena deseada, en nuestro caso la del etanol. (Cortes, 2014)

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

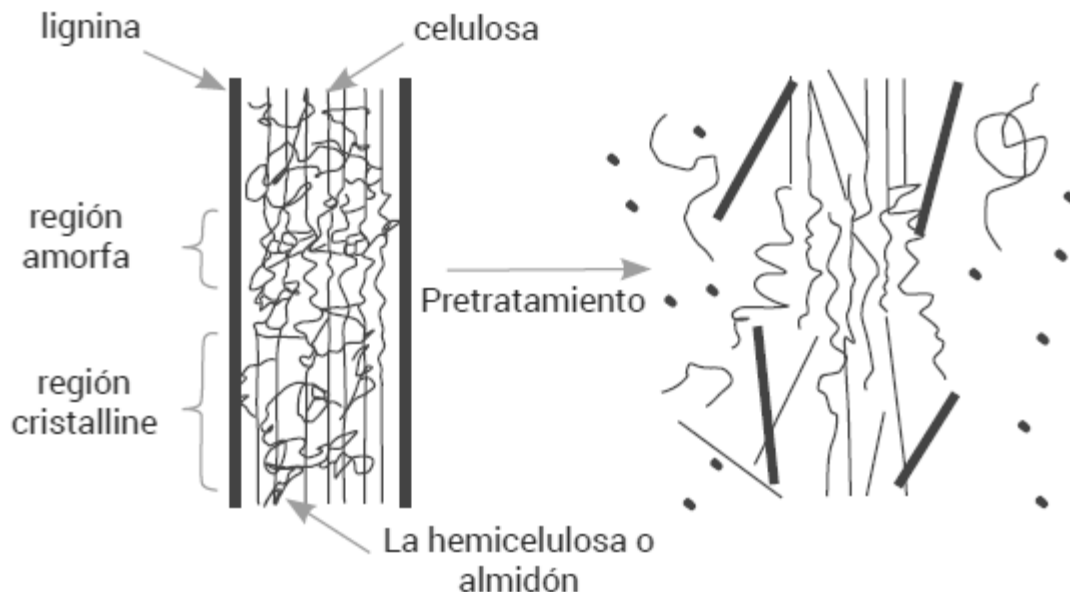


Imagen 2-1. Estructura de la biomasa lignocelulósica. (Cortes, 2014)

De forma general, el proceso para obtener bioetanol se compone de:

1. Pretratamiento(s).
2. Hidrólisis o sacarificación.
3. Fermentación.
4. Destilación.

2.2.1 Pretratamientos.

Se utilizan principalmente 6 tipos de pretratamientos:

1. **Pretratamiento mecánico.** Su objetivo es reducir el tamaño de las partículas, así como su cristalinidad, esto hace posible reducir el grado de polimerización, es decir facilita la formación de monómeros en grandes cadenas y de esta forma aumentar el rendimiento de la hidrólisis total.
2. **Pretratamiento térmico.** Se trata de aumentar la temperatura entre los 150 °C y 180 °C. En el material lignocelulósico la hemicelulosa comenzará a ser soluble y a mayor temperatura la lignina.
3. **Pretratamiento con vapor de agua.** En este pretratamiento la biomasa es sometida a temperaturas hasta los 240 °C y grandes presiones. “El objetivo de un pretratamiento con vapor o de explosión con vapor es solubilizar la hemicelulosa y así tener mejor acceso para la hidrólisis enzimática de la celulosa evitando la formación de los inhibidores.” (Cortes, 2014)
4. **Pretratamiento con agua caliente o hidrotermal.** En este caso la biomasa se expone a agua líquida caliente, la idea es “... evitar la formación de inhibidores, (para ello) el pH debe mantenerse entre 4 y 7 durante el pretratamiento. Mantener este rango de pH minimiza la formación de los monosacáridos, y por lo tanto también la formación de productos de degradación que pueden seguir catalizando la hidrólisis del sustrato.” (Cortes, 2014)
5. **Pretratamiento ácido.** En temperatura ambiente se realiza para mejorar la digestibilidad anaerobia. “El objetivo es solubilizar la hemicelulosa, y lograr con esto mejor acceso a la celulosa agregando algún tipo de ácido a la solución” (Cortes, 2014)
6. **Pretratamiento alcalino.** La idea es someter al material a grandes concentraciones alcalinas donde una hidrólisis alcalina logra una degradación y

descomposición de polisacáridos. “Durante el pretratamiento alcalino las primeras reacciones que tienen lugar son la solvatación y saponificación. Esto provoca que la biomasa se expanda, lo cual la hace más accesible a las enzimas y bacterias”

Después del pretratamiento se logra obtener:

1. Fracción sólida insoluble en agua, donde se tienen mayor mente celulosa y lignina.
2. Fracción líquida que contiene hemicelulosa.

2.2.2 Hidrólisis.

Las fracciones sólidas y líquidas pasan al proceso de hidrólisis para obtener monómeros, en este caso monosacáridos como hexosas (seis átomos de carbono en su estructura molecular, como glucosa, fructosa y galactosa) y pentosas (cinco átomos de carbono en su estructura molecular, como la ribosa, xilosa, lixosa, arabinosa), los monómeros seleccionados serán fermentados posteriormente.

En general el proceso de hidrólisis se refiere a la reacción donde una molécula de agua romperá sus enlaces químicos para ionizar las partes de otra que por lo general será una macromolécula. De tal forma que habrá un aumento de iones hidronio o modificará la concentración de iones OH. Esto es, hay una disociación de la molécula de agua para ceder o ionizar una segunda molécula.

Uno de los objetivos de hacer esto es para descomponer las moléculas en componentes más pequeños o específicos ya sea para tener un tratamiento posterior o para obtener algún compuesto deseado. En general se puede expresar su fórmula como la mostrada en la ecuación (1):



Donde:

AB: Es la molécula que se hidroliza.

H₂O: Molécula de agua.

AH: Producto de la adición del ion hidrógeno (H) a la parte A de la molécula original.

BOH: Producto de la adición del ion hidroxilo (OH) a la parte B de la molécula original.

Una de las consecuencias de hidrolizar una sustancia es la de lograr una variación en su pH, ya sea que se aumente el pH, bajando la concentración de iones de hidrógeno, esto es que pueda donar haciéndola alcalina, o bajando el pH, esto es aumentando la concentración de iones de hidrógeno que pueda liberar en soluciones acuosas haciéndolas ácidas.

Dentro de la clasificación de tipos de hidrólisis podemos encontrar:

Hidrólisis de ácido-base. Es una de las más comunes y se refiere a la reacción de una sal con agua, donde se produce la interacción entre cationes o aniones de sales y agua. Durante la hidrólisis, una sal se descompone para formar iones, total o parcialmente, dependiendo del factor de solubilidad. De este tipo se tienen 4 subclasificaciones:

1. Hidrólisis de sal de ácido fuerte-base fuerte.
2. Hidrólisis de sal de ácido débil-base fuerte.
3. Hidrólisis de sal de ácido fuerte-base débil.
4. Hidrólisis de sal de ácido débil-base débil.

Hidrólisis de amidas y ésteres. Amidas: compuestos orgánicos donde se tiene un carbono (C) unido a un doble enlace a un oxígeno (=O) y con un enlace siempre a un nitrógeno (-N), -CONH₂. Ésteres: compuestos orgánicos donde un carbono (C) se une con un doble enlace a un oxígeno (=O) y con un enlace simple a otro oxígeno (-O) y esta unión se encuentra entre dos cadenas de carbonos, R-COO-R'. Estos dos compuestos de hacen reaccionar con agua (H₂O) y calor en un medio ácido-básico y el resultado puede ser: en el caso de un éster una molécula de un ácido + una del alcohol, en el caso de las amidas una de ácido + amoníaco.

Hidrólisis enzimática. En este caso la reacción ocurre en presencia de alguna enzima y son las que mayormente ocurren en los organismos vivos. Estas enzimas actúan como catalizadores, esto es que aumenta la velocidad de reacción, para descomponer proteínas, lípidos, aceites, grasas y carbohidratos.

2.2.3 Fermentación.

La palabra “fermentar” tiene su origen etimológico de la palabra latina “*fervere*” o estar en ebullición, burbujeo o hervir, esto puede deberse a que en los procesos fermentativos es posible observar un burbujeo que técnicamente se le conoce como anhídrido carbónico o dióxido de carbono.

“La fermentación se define como el conjunto de reacciones químicas que sufre una sustancia orgánica de origen vegetal libre de nitrógeno, por medio de ciertos microorganismos (bacterias, bacilos, levadura o mohos), y que generalmente van acompañadas de un desprendimiento gaseoso y producción de energía.” (Delgado, 2009)

Los objetivos de la fermentación es la de estimular a los microorganismos que generar procesos químicos de diversas índoles, por ejemplo, prolongar la vida útil de algunos alimentos, actuando como conservador ya que crea un ambiente ácido donde es difícil la proliferación de agentes patógenos. Así mismo en los alimentos puede incrementar propiedades como aromas, texturas y sabores, también puede aumentar la cantidad presente de nutrientes en algunos alimentos. Por otro lado, es parte del proceso para producción de vitaminas, enzimas o antibióticos. Y en la digestión ayuda a el cuerpo pueda metabolizar de mejor forma algunos alimentos. O como en la presente investigación ayuda a obtener productos energéticos como el bioetanol.

Los microorganismos que están presentes en la fermentación son: bacterias, hongos y/o levaduras en un ambiente libre de oxígeno, también conocido como un proceso anaerobio, aunque en algunos casos puede ser un proceso aeróbico, estos procesos dan cabida a diferentes tipos de fermentaciones, entre las cuales podemos nombrar las siguientes:

Fermentación láctica. En este tipo de fermentación se convierten glúcidos como la glucosa, en ácido láctico con producción de una pequeña cantidad de energía metabólica en forma de ATP (Trifosfato de Adenosina). “El ácido láctico es totalmente miscible en agua, alcohol y éter, pero insoluble en cloroformo; polimeriza fácilmente. Estas propiedades, le dan una gran importancia en las industrias alimentaria, farmacéutica, textil y química; por ejemplo, se utiliza en la acidificación de salmueras para la conservación de aceitunas, en la acidificación de sopas y jamones, en la neutralización de soluciones de sosa en la industria peletera, en la terminación de las telas de "rayón" y en la conversión a resinas termoplásticas y elásticas en la industria de los plásticos.” (Zalduegui, 1975).

Fermentación propiónica. Este tipo de fermentación la lleva principalmente un grupo de bacterias del género *Propionobacterium* y su principal producto final es el ácido propiónico el cual ayuda a la producción de las burbujas de anhídrido carbónico y son las causantes de los orificios característicos del queso Emmental o Gruyere, así como para su aroma, acides y sabor característico.

Fermentación acética. Como su nombre lo dice el objetivo principal de este tipo de fermentación es la de generar ácido acético, normalmente presente en el vinagre, dándole a este su olor y sabor característico. Pero también es utilizado en la industria para la elaboración de productos de limpieza, cosméticos o alimentaria.

Fermentación butírica. Parecido al caso anterior este tipo de fermentación se refiere a la conversión de los glúcidos en ácido butírico, donde están involucradas principalmente las bacterias anaerobias *Clostridium*. Las alteraciones que se generan con el uso de estas bacterias en los alimentos son aprovechadas también para darle ciertas características de olores y sabores a quesos como el Roquefort, Blue cheese, Gorgonzola o Stilton.

Fermentación alcohólica. El objetivo de este tipo de fermentación es la de transformar materias primas ricas en carbohidratos, en específico azúcares reductores, en alcohol etílico (etanol) y dióxido de carbono como productos principales. La familia de levaduras principalmente usadas en este proceso con las *Saccharomyces spp.* y también son usadas las bacterias *Zymomonas mobilis*. La reacción general que se pretende se muestra en la ecuación (2):



Que es la transformación de la glucosa (izquierda) en dos moléculas de alcohol y 2 de dióxido de carbono. Los azúcares son descompuestos por la levadura o bacteria seleccionada para formar células de piruvato o moléculas de ácido pirúvico, este proceso es llamado glucólisis, este ácido es convertido a acetaldehído y finalmente es transformado a las dos moléculas de etanol y dióxido de carbono.

2.2.4 Destilación.

De manera general los elementos químicos que buscamos están dentro de una mezcla de sustancias ya sea de forma heterogénea (los componentes son visibles y no están uniformemente distribuidos) o homogénea (están distribuidos uniformemente y no se distinguen a simple vista). Para aislarlos se han desarrollado diferentes métodos de separación dependiendo las propiedades físicas del elemento en cuestión. Entre los de uso común tenemos:

- Decantación.
- Filtración.
- Separación magnética.
- Tamizado.
- Sublimación.
- Centrifugado
- Sedimentación.
- Evaporización.
- Cristalización.
- Cromatografía.
- Destilación.

En el presente trabajo nos enfocaremos en el proceso de destilación, el cual consiste en aplicar procesos físicos de evaporización y condensación de forma controlada a mezclas que por lo general son homogéneas.

El proceso se basa en el punto de ebullición de las distintas sustancias que componen la mixtura. Para que sea efectiva y tenga una eficiencia considerable, las sustancias deberán tener puntos de evaporización distintos y lo más separado posibles. El proceso consiste en elevar la temperatura de la mezcla, la sustancia con menor punto de ebullición será la primera en evaporarse, este vapor puede ser “atrapado” y condensado de forma independiente obteniendo así una mezcla resultante con un porcentaje muy elevado de pureza. Las sustancias que no tengan la misma temperatura de saturación se mantendrán en el recipiente original libres en un alto porcentaje también de la sustancia que fue evaporada.

Los tipos de destilación más comunes son:

Destilación simple. Como su nombre lo dice es el tipo de destilación más básica. Consiste en calentar la mezcla, hacer pasar los vapores por un tubo de vidrio llamado “cabeza de destilación” que bifurca el vapor hacia un condensador y posteriormente a un recipiente que recibe la sustancia ya separada. Es muy útil cuando los puntos de ebullición tienen una diferencia de más de 25 °C aproximadamente, de lo contrario el nivel de pureza baja considerablemente.

Destilación fraccionada. Cuando se tiene puntos de ebullición cercanos la destilación simple ya no es una opción. En esos casos la destilación fraccionada se encarga de separar las sustancias por medio de ciclos de evaporización y condensación a lo largo de una trayectoria más larga que el caso anterior a través de un tubo llamado “columna de fraccionamientos”. Esto permite una separación de los compuestos mucho más eficiente y pura que el caso anterior.

Destilación al vacío. Este tipo de destilación se utiliza cuando los puntos de ebullición de la o las sustancias deseadas son muy altos. Para disminuir este punto y eficiente el consumo energético la destilación se realiza modificando la presión hasta generar un vacío, esto hace que el punto de ebullición baje se consume menos energía y se acelera el proceso.

Destilación azeotrópica. El término azeótropo o mezcla azeotrópica, se da cuando las sustancias involucradas se comportan como una sola, por lo tanto, al llegar al punto de ebullición el vapor contendrá casi el mismo compuesto que el estado líquido. Este caso sucede cuando el punto de evaporación de las sustancias es muy cercano. Para eliminar este problema se trata de modificar el punto de ebullición de alguna de las sustancias de la mixtura agregando agentes separadores como el carbonato de potasio, benceno (tolueno o metilbenceno), ciclohexano o tamices moleculares.

3 Metodología

Las materias sacaroideas requieren por lo general de algún tratamiento previo para que la materia celulósica pueda ser hidrolizada a azúcares fermentables antes que las bacterias actúen sobre ellas. El éxito en cualquier proceso depende de la eficacia del tratamiento preliminar de la concentración del azúcar, el pH y de la temperatura óptima. Como se mencionó el proceso general para la producción de bioetanol consiste en 4 etapas: Pretratamiento, hidrólisis, fermentación y destilación. En el presente capítulo se detallará cada una de ellas en la investigación realizada, así como procesos complementarios.

3.1 Obtención y selección de la materia prima.

La variedad de mezquite a utilizar será la *Prosopis laevigata* que es la que se encuentra comúnmente en el Valle del Mezquital, Hidalgo. México.

Lugar de obtención:

- Plutarco Elías Calles, Zimapán, Hidalgo México.
- Coordenadas Geográficas; 20.730102, -99.376642.
- Fecha de recolección: 20 abr 2024.
- Tipo de recolección: Cosecha por caída.

Separación de las vainas.

Se recolectaron aproximadamente 10 kg de vainas de mezquite, se trasladaron al laboratorio y de ellas:

- Se seleccionaron vainas con morfología lo más uniforme posible, con pigmento colores rojizo y amarillo, así como tamaño entre 10 y 20 cm aproximadamente.
- Que muestre semillas abultadas no aplanadas.
- Que no presentaran signos de descomposición ni presencia de hongos o insectos.
- Que sean vainas completas, no solo parte de ellas.
- Que no muestren pigmentación demasiado oscura, como puede observarse en Imagen 3-1 e Imagen 3-2



Imagen 3-1. Vainas del mezquite seleccionadas.



Imagen 3-2. Vainas del mezquite desechadas.

3.2 Pretratamiento mecánico.

Se seleccionó 1 kg al azar de las vainas previamente seleccionadas. Se distribuyeron uniformemente en un horno de secado a temperaturas entre 75 °C y 80 °C durante 12, 24 y 36 horas, durante el secado se tomó el peso total de la muestra hasta alcanzar un valor constante. Al obtener este último valor se determinó la humedad correspondiente y se procedió a la molienda.

La trituración de la vaina se realizó en un equipo Oster Mod. BLST4655-013 hasta obtener una mezcla de harina y cascara de semilla. Se trabajó solo con el producto pulverizado así que fue necesario tamizar dicha mixtura hasta obtener solo el componente deseado. El producto final se colocó y etiquetó en una bolsa hermética mostrado en la Imagen 3-3.



Imagen 3-3. Pretratamiento mecánico.

3.3 Presencia de azúcares reductores.

Para determinar si la materia prima tenía presencia de azúcares reductores de forma cualitativa se utilizaron dos pruebas con reactivos en laboratorio que a continuación se detallan.

Prueba de Benedict. Esta prueba consiste en hacer un pretratamiento hidrotermal de la materia prima y someterlo al reactivo de Benedict, después se coloca en baño maría y se compara la tonalidad con una tabla de color de Benedict.

1. Para 100 ml del reactivo de Benedict tenemos:
 - a. 1.730 g de Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).
 - b. 17.30 g de Citrato de sodio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$).
 - c. 20.00 g de Carbonato de sodio (Na_2CO_3).
 - d. 100 ml de agua desionizada.
2. Pretratamiento hidrotermal: Se colocaron 2g de harina de mezquite en 20 ml de agua destilada y se calentó por 10 min.
3. Colocación de reactivo de Benedict. En 2 ml del reactivo de Benedict se colocaron 2 ml de la muestra pretratada. Con ayuda de un agitador tipo Vórtex se mezclaron las sustancias. Se pusieron en baño maría por 10 min a una temperatura aproximada de 80°C.

Prueba de Fehling. Esta prueba también es necesario hacer un pretratamiento hidrotermal de la materia prima y someterlo a un reactivo A y un reactivo B de Fehling, se coloca en baño maría. La tonalidad al finalizar el proceso nos dará el resultado.

1. Para 100 ml del reactivo de Fehling tenemos dos componentes:
 - a. Solución A:
 - i. 3 g de Sulfato de Cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).
 - ii. 100 ml de agua bidestilada.
 - b. Solución B:
 - i. 34 g de tartrato de sodio y potasio.
 - ii. 10 g de hidróxido de sodio.
 - iii. 100 ml de agua bidestilada.
2. Pretratamiento hidrotermal. Se utilizó el mismo pretratamiento anterior.
3. Colocación del reactivo de Fehling. En 1 ml de reactivo A y 1 ml de reactivo B, se colocaron 2 ml de la muestra pretratada. Con ayuda de un agitador tipo Vórtex se mezclaron bien las sustancias. Se pusieron en baño maría por 10 min a una temperatura aproximada de 80°C .

Grados Brix ($^\circ\text{Bx}$). Una forma de medir la concentración de sólidos solubles, esto es, las sustancias disueltas en un líquido son por medio de los $^\circ\text{Bx}$, en el presente trabajo específicamente sólidos de azúcar. Se utilizó un refractómetro digital marca Hanna, Modelo HI96801 calibrado para hacer mediciones de porcentaje de sacarosa. Se realizaron diversos pretratamientos hasta alcanzar el número máximo de $^\circ\text{Bx}$, esto con la finalidad de obtener un número base que nos orientara como obtener la mejor concentración de azúcares para poder ser fermentadas posteriormente.

3.4 Análisis de los espectros de infrarrojo

Se analizaron tres espectros FTIR correspondientes a muestras etiquetadas como “Mezquite claro”, “Mezquite oscuro” y “Mezquite en descomposición”, registrados como número de onda (cm^{-1}) vs porcentaje de transmitancia (%T) con el objetivo de realizar la comparación espectral y la asignación de bandas, los datos en %T fueron transformados a absorbancia mediante la relación: $A = -\log_{10}(T)$, donde $T = \%T/100$. Posteriormente, los espectros se ordenaron por número de onda y se graficaron en el rango completo ($\approx 4000\text{--}650 \text{ cm}^{-1}$) empleando el eje de número de onda en sentido decreciente (convención IR). Se generaron tres gráficas individuales (una por muestra) y una gráfica de superposición para la comparación directa. La búsqueda de señales compatibles con carbohidratos/glucosa se enfocó especialmente en la región de huella digital $1200\text{--}900$

cm^{-1} (vibraciones C-O/C-O-C) y en el estiramiento O-H $3400\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$, considerando reportes de asignación vibracional para glucosa y carbohidratos. (Morales-Reyna, 2026)

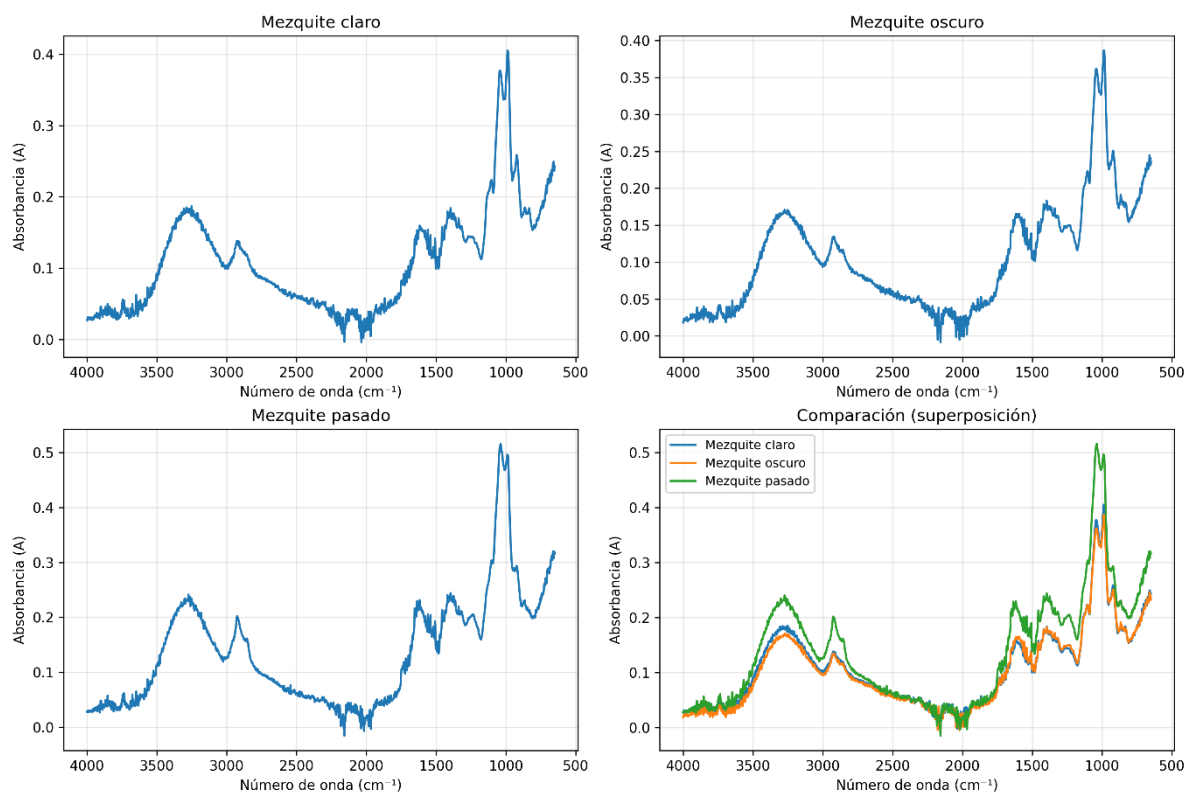


Imagen 3-4. Espectros de infrarrojo en modo absorbancia correspondiente a tres muestras de mezquite.

3.5 Pretratamiento hidrotermal e hidrólisis.

Después de realizar algunas pruebas se seleccionaron estos dos pretratamientos para tratar de obtener el mayor número de °Bx posibles.

Para el pretratamiento hidrotermal:

- En un primer ensayo se colocaron 4 concentraciones diferentes de harina de mezquite en 100 ml de agua en matraces de 250 ml.
- Con apoyo de una parrilla de agitación con calentamiento LaTech modelo LMS-1003, se aumentó la temperatura entre los 80°C y 85°C y se mantuvo constante por 15 min. La muestra se mantuvo en agitación durante ese tiempo.
- Se retiró la muestra y se dejó enfriar hasta alcanzar el equilibrio con la temperatura ambiente.
- Se tamizó la mezcla para desechar los sólidos y se repitió el experimento con el resto de las concentraciones.
- El sobrenadante ya filtrado fue utilizado para las mediciones de °Bx para los 4 experimentos.

Se realizó una prueba de hidrólisis en un medio ácido para determinar si mejora el número de °Bx, para ello se utilizaron ácido sulfúrico a un 6 % y ácido cítrico también a un 6 %, las muestras fueron intervenidas con una autoclave a presión 15 psi y a una temperatura de 121 °C.

- Se seleccionaron las concentraciones de harina de mezquite de 1:10 y 1:20 en 100 ml de agua bidestilada cada uno.
- Se midió el pH de ambos experimentos antes y después de agregarle los ácidos.
- Se realizaron dos pruebas con 2 concentraciones diferentes de ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) a 1 ml y 5 ml.
- Se realizaron dos pruebas con 2 concentraciones diferentes de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 0.5 ml y 1 ml.
- Una vez realizada la mezcla: harina de mezquite + agua bidestilada + ácido x, se colocaron en la autoclave a una presión de 15 psi y 121°C de temperatura por 20 min.
- Al terminar el proceso de la autoclave se tomaron mediciones de °Bx y pH.
- Se aprovecho para ver la concentración necesaria de elementos básicos para neutralizar el pH, ya que los niveles pudieron ser muy ácidos y no en valores óptimos para la fermentación, para ello se probó con carbonato de sodio (Na_2CO_3) e hidróxido de sodio (NaOH) en concentraciones al 1:15 y 1:10 respectivamente, a la mezcla de los 100 ml se le agregaron 1 ml y 2 ml de cada uno de las bases y

posteriormente se midió el pH para ver si se mantenía en un nivel entre 4 y 5 óptimo para el siguiente proceso.

- Se comparó con los resultados de °Bx obtenidos con el pretratamiento hidrotermal.

3.6 Fermentación.

Para el proceso de fermentación es necesario seleccionar algún microorganismo que sea capaz de convertir los azúcares reductores en etanol. En este caso se realizaron experimentos con diferentes tipos de levadura seca, se probó con levadura comercial para pan marca Tradipan, la cual no especifica la variedad utilizada, levadura marca SafeAle S-04 la cual menciona que es *Saccharomyces cerevisiae* y levadura a granel que se sabe es una especie de *Saccharomyces* pero no la variedad.

Adicionalmente, como parte de la investigación se realizaron pruebas con el compuesto de la bebida tradicional mexicana llama *Pulque*, la cual investigaciones realizadas contiene variedades de *Saccharomyces spp.* y la bacteria *Zymomonas mobilis*, ambas apoyan al proceso de fermentación. (Mendoza-Espinoza J.A., 2015) (Cervantes-Contreras, 2008). Se utilizó bebida de la misma zona de recolección del mezquite, esto es en Zimapán, Hidalgo, México.

En el caso de las primeras variedades de levadura no fue necesario hacer ninguna preparación previa ya que son comercializadas al público en general y pueden ser adquiridas fácilmente, pero para la utilización de los microorganismos presentes en el pulque se realizó el siguiente proceso:

- Se adquirieron dos tipos de pulque en diferentes momentos fermentativos
 - Pulque madre, fuerte, semilla o pie de pulque. El cual corresponde al líquido “viejo” esto es, con una o varias semanas de fermentación.
 - Pulque bebible que tiene menos de 12 horas de fermentación.
- Se trasladaron al laboratorio en recipientes de 2 litros cada uno y se colocaron en refrigeración el mismo día que fueron adquiridos.
- Se dejaron “reposar” durante 24 horas para que por decantación los microorganismos se asentaran en el fondo de los recipientes.
- Los sobrenadantes fueron retirados y el “asiento” fue centrifugado a 7500 rpm. durante 15 min. Para eliminar el líquido restante.
- Se tomó una muestra de los sólidos restantes y se observaron en microscopio para comprobar el tipo de microorganismos presentes y comprobarlos con los resultados e imágenes publicados por (Cervantes-Contreras, 2008).
- Se precedió a activar las levaduras seleccionadas, y el sustrato de pulque para empezar la fermentación. Para la activación de la levadura a granel se agregaron 3 g en 30 ml de agua con 0.6 g de azúcar común refinada. Para el caso del asiento de

Pulque, se utilizaron 15 g en 30 ml de agua y 1.75 g de azúcar común refinada, se dejó reposar por 12 horas para una activación idónea.

Una vez activados los microorganismos se procedió al inicio de la fermentación.

- Se prepararon 3 recipientes con 1000 ml de agua potable junto con 200 g de harina de mezquite, se realizó el pretratamiento hidrotermal antes mencionado. Después de dejar reposar se tamizó el contenido para trabajar con el mayor número de líquidos posibles con el menor número de sólidos. Al final se obtuvieron 3 muestras con 580 ml cada una.
- Estas tres muestras se prepararon de la siguiente forma:
 - Muestra 1: 580 ml de agua potable + sustrato de mezquite 1:20 + 17.4 ml levadura activada.
 - Muestra 2: 580 ml de agua + sustrato de mezquite 1:20 + 17.4 ml de asiento de pulque activado.
 - Muestra 3: 580 ml de agua + sustrato de mezquite 1:20 + 8.7 ml levadura + 8.7 ml asiento de pulque activadas.
- Se colocaron en fermentadores de forma anaerobia y se dejaron en agitación.
- Cada 24 horas aproximadamente se tomaron medidas de ° Bx y pH.
- El proceso se detuvo cuando ya no se observó mayor variación en los °Bx.

3.7 Destilación.

Una vez detenida la fermentación de las muestras se continuó con el proceso de destilación para la obtención de alcohol, esto es la destilación. Para ello se seleccionó la destilación fraccionada utilizando el arreglo mostrado en la Imagen 3-5. Donde se destaca el uso de una columna de fraccionamiento como principal componente del tipo de destilación utilizado.

- En el matraz de bola fueron colocadas una a una las muestras fermentadas.
- Se encendió la bomba del refrigerante.
- La energía para aumentar la temperatura fue proporcionada por una parrilla eléctrica con agitación, se encendió a su máxima potencia hasta que la mezcla alcanzara entre 70 y 80°C. En este momento se fue regulando para mantener una temperatura estable.



Imagen 3-5. Arreglo para destilación

- Aproximadamente 30 min después empezó el goteo ya con el producto deseado.
- Con un hidrómetro del alcohol se determinó el grado de concentración.

4 Resultados.

- En un primer experimento se colocaron 4 muestras de vaina de mezquite en un horno de secado a una temperatura de 55 °C, los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Secado de la vaina de mezquite, 1er experimento.

Día / hora de medición	Peso Muestra 1 / % Cambio	Peso Muestra 2 / % Cambio	Peso Muestra 3 / % Cambio	Peso Muestra 4 / % Cambio
Día 1 / 11:12 am	10.87 g / 0 %	20.35 g / 0 %	30.17 g / 0 %	40.78 g / 0 %
Día 2 / 12:45 pm	10.32g / -5.05 %	19.43 g / -4.55 %	28.90g/-4.20 %	38.67g/-5.17 %
Día 3 / 14:20 pm	9.77g / -10.11 %	18.35 g / -9.86 %	27.22g/-9.77 %	36.67g/-10.07 %
Día 4 / 3:00 pm	9.58g / -11.86 %	18.01g / -11.53 %	26.74g/-11.44 %	36.14g/11.37 %
Día 5 / 2:55 pm	9.31 g / -14.35 %	17.71g/-13.00 %	26.35g/-12.66 %	35.43g/13.11 %
Día 6 / 10:40 am	9.33 g / -14.16 %	17.71 g/-13.00 %	26.26g/-12.95 %	35.29g/-13.46 %
Día 7 / 12:10 am	9.33 g / -14.16 %	17.70 g / -13.05 %	26.25g/-12.98	35.29g/-13.46 %

- Se realizó un segundo experimento con dos muestras con un peso de 100 g cada una y aumentando la temperatura a 75 °C, esto redujo considerablemente el tiempo de secado, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Secado de mezquite, 2o experimento.

Día / hora de medición	Peso Muestra 1 / % Cambio	Peso Muestra 2 / % Cambio
1 / 2:30 pm	100 g / 0 %	100 g / 0 %
2 / 2:40 pm	89.80 g / -10.20 %	89.77 g / -10.23 %
2 / 6:40 pm	89.75 g / -10.25 %	89.75 g / -10.25 %
3 / 12:15 pm	89.447 / -10.56 %	89.21 / -10.79 %
3 / 13:50 pm	89.42 / -10.58 %	89.11 / -10.89 %
3 / 17:45 pm	89.42 / -10.58 %	89.10 / -10.90 %

- Una vez realizado el secado se continuo con la molienda y se pasó por un tamiz para trabajar únicamente con la harina de mezquite. Aproximadamente entre el 30 y 40 % fueron residuos de cascara de la vaina y de la semilla, el resto fue harina de mezquite que fue utilizada como sustrato para continuar la experimentación.
- Las pruebas de Benedict y de Fehling mostraron que efectivamente si había presencia de azúcares reductores acorde a las tonalidades mostradas en la Imagen 4-1.

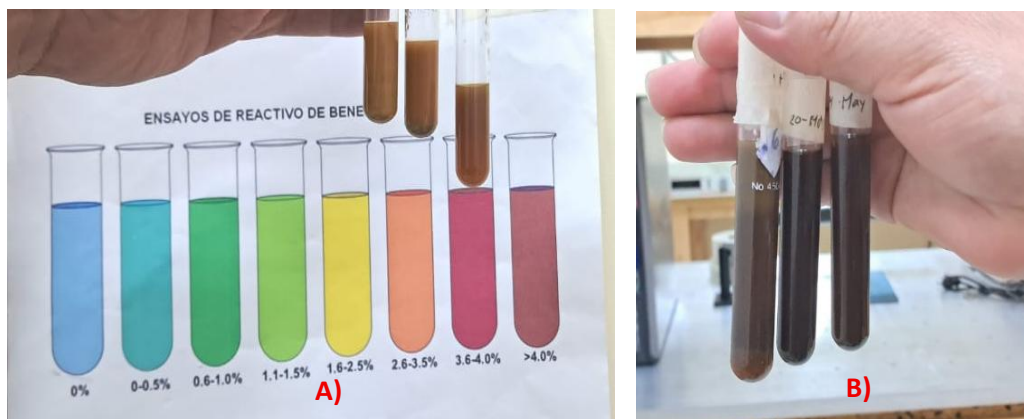


Imagen 4-1. Pruebas de Benedict (A) y Fehling (B).

- El análisis de los espectros FTIR en absorbancia indica diferencias claras en el contenido relativo de compuestos fermentables entre las muestras de mezquite evaluadas. En particular, la muestra mezquite en descomposición presenta la mayor intensidad y definición de bandas en la región $1200-900\text{ cm}^{-1}$, atribuida a vibraciones C-O y C-O-C características de azúcares simples y carbohidratos

fácilmente hidrolizables, así como un incremento notable en la banda ancha de estiramiento O–H ($3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$), asociada a grupos hidroxilo abundantes y agua ligada. Este patrón espectral sugiere una mayor concentración relativa de azúcares disponibles, principalmente monosacáridos y oligosacáridos, que constituyen los sustratos primarios para la fermentación alcohólica por levaduras. En contraste, las muestras de mezquite claro y mezquite oscuro muestran el mismo conjunto de bandas asociadas a carbohidratos, pero con menor intensidad relativa, lo que indica una menor disponibilidad de azúcares fermentables. La similitud entre estas dos muestras sugiere que, en etapas menos avanzadas de maduración o transformación del mezquite, una fracción importante de los carbohidratos permanece estructural o menos accesible para la fermentación.

- En conjunto, los resultados FTIR permiten proponer que el mezquite pasado posee la mayor probabilidad de producir alcohol, debido a su perfil espectral enriquecido en señales compatibles con azúcares fermentables, lo que lo convierte en el candidato más favorable para procesos de fermentación alcohólica. No obstante, esta inferencia debe considerarse semi-cuantitativa, y su confirmación requiere la cuantificación directa de azúcares reductores y fermentables mediante técnicas complementarias como HPLC o ensayos enzimáticos, así como pruebas fermentativas controladas.
- Los resultados del pretratamiento hidrotermal se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7. Resultados de un primer pretratamiento hidrotermal a una solución de harina de vaina de mezquite.

Concentración.	°Bx
<i>10 g mezquite (1:10)</i>	7.0
<i>15 g mezquite (1:15)</i>	9.5
<i>20 g mezquite (1:20)</i>	12
<i>25 g mezquite (1:25)</i>	20 (ya muy espeso)

- En un segundo experimento hidrotermal se aumentó el tiempo de exposición de calor entre 25 y 30 min en recipientes metálicos y con tapa. El resultado se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de un segundo pretratamiento hidrotermal a una solución de harina de vaina de mezquite.

Concentración.	°Bx
20 g mezquite (1:20)	14-15

- Para el pretratamiento en medio ácido se consideraron 2 concentraciones en 100 ml:
 - Muestra 1 (1:10) Sustrato de harina de vaina de mezquite. pH inicial: 5.38
 - Muestra 2 (1:20) Sustrato de harina de vaina de mezquite. pH inicial: 5.26
- Se realizaron 2 soluciones de cada concentración y a cada una se agregaron 1ml y 5 ml de $C_6H_8O_7$ y a las otras 0.5ml y 1ml de H_2SO_4 .
- Después de introducirlos a la autoclave los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Pretratamiento en medio ácido del sustrato de la vaina de mezquite.

Tipo de Acido utilizado	Cantidad agregada: ml	Concentración del sustrato	Antes de entrar a la autoclave		Después del proceso de Autoclave	
			pH	°Bx	pH	°Bx
$C_6H_8O_7$	1	1:10	4.79	4.5	4.7	5.7
	5	1:10	4.05	4.4	4.05	5.7
H_2SO_4	0.5	1:10	4.61	4.4	4.54	5.9
	1	1:10	4.16	4.3	4.15	5.8
$C_6H_8O_7$	2	1:20	4.69	8.5	4.67	10.3
	10	1:20	4.03	8.1	4.02	10.5
H_2SO_4	1	1:20	4.5	8.6	4.53	10.6
	2	1:20	4.06	8.5	4.02	10.9

- Se agregaron las concentraciones propuestas de sustancias base para eliminar un poco la acidez de los productos finales anteriores. Se utilizó carbonato de sodio (Na_2CO_3) a 1:15 e hidróxido de sodio a 1:10, se probaron 1ml y 2 ml respectivamente a cada una de las muestras. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10 Experimento para neutralizar el compuesto con elementos básicos.

Pretratamiento ácido	pH original	Cantidad de compuesto básico	pH utilizando Na_2CO_3	pH utilizando NaOH
1:10 del sustrato tratado con 5 ml ácido cítrico	4.05	1 ml	4.41	4.73
		2 ml	4.86	5.49
	4.15	1 ml	5.39	6.25

1:10 del sustrato tratado con 1 ml ácido sulfúrico		2 ml	6.47	8.84
1:20 del sustrato tratado con 10 ml ácido cítrico	4.02	2 ml	5.46	5.69
		4 ml	5.61	8.74
1:20 del sustrato tratado con 2 ml ácido sulfúrico	4.02	2 ml	5.57	7.35
		4 ml	5.6	8.96

Una vez que se obtuvieron los sólidos de la muestra de pulque y los sobrenadantes fueron retirados se observaron a microscopio tres muestras: agua miel, pie de pulque y pulque bebible. Las imágenes obtenidas se muestran en las imágenes 4-2, 4-3 y 4-4

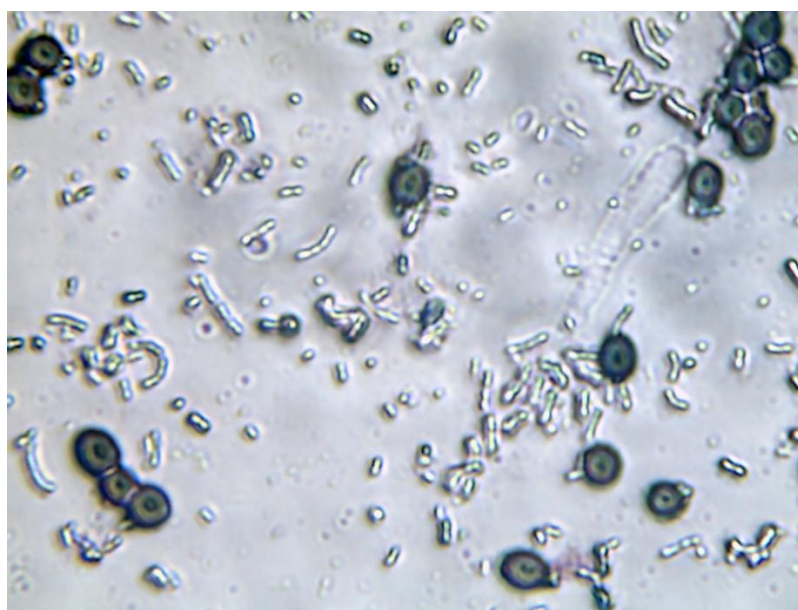


Imagen 4-2. Imagen de microscopio de una muestra de "Agua Miel"

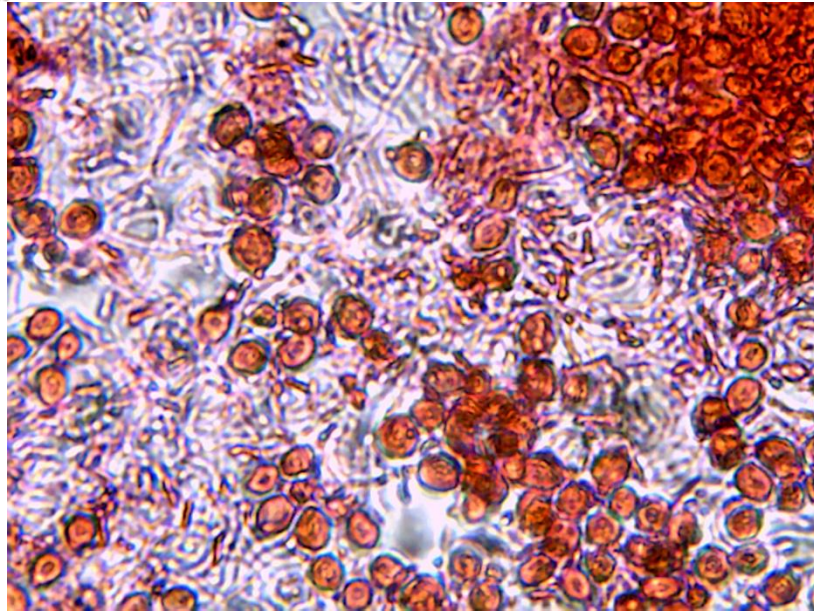


Imagen 4-3. Imagen de microscopio de una muestra de "Pie de Pulque".

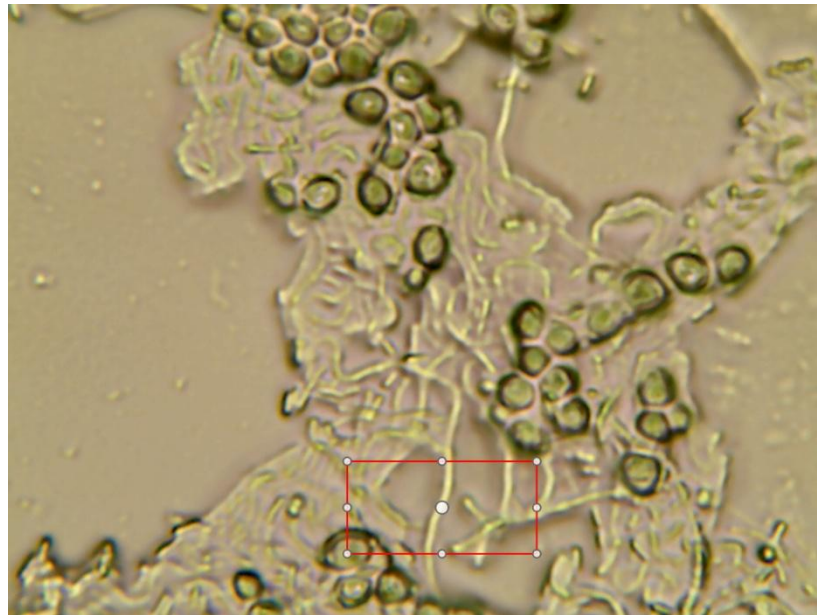


Imagen 4-4. Imagen de microscopio de una muestra de "pulque bebible".

- De acuerdo con la literatura (Cervantes-Contreras, 2008) se pueden distinguir claramente las levaduras *Saccharomyces sp*, las bacterias *Zymomonas sp*, y *Leuconostoc sp*.

- Una prueba visual de la activación de los microorganismos es la actividad que se presenta en los recipientes. Por lo general la activación se realiza con azúcares, en la Imagen 4-5 se muestra levadura activada tanto con azúcar de refinada de mesa como con harina de mezquite.

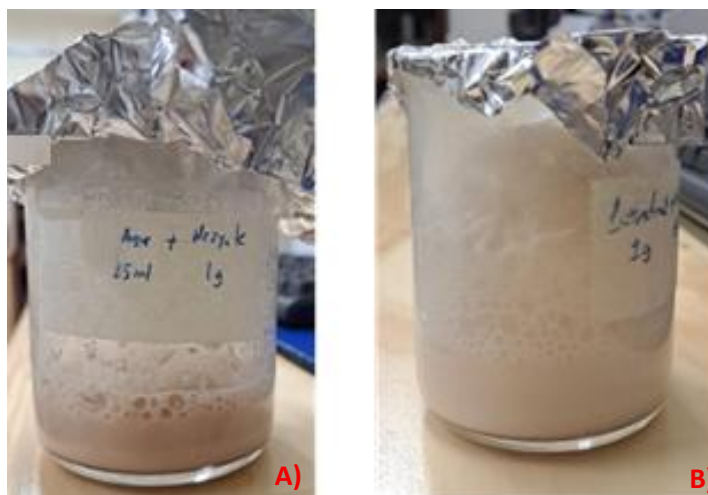


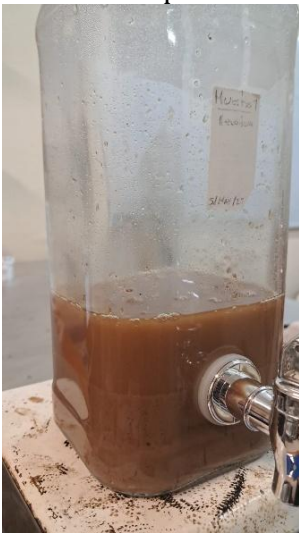
Imagen 4-5. Activación de levadura con harina de mezquite (A) y azúcar refinada (B).

- Las burbujas observadas nos confirman la presencia de azúcares en la harina de mezquite, complementando con ello los resultados anteriores.
- Se realizaron varios experimentos de fermentación modificando variables como temperatura, luminosidad, agitación, concentración de sustrato y de microorganismos. Para ello se adaptaron 3 vitroleros con salida inferior a través de una llave de paso, esto para facilitar la toma de muestras y poder medir tanto pH como °Bx.
- Se consideraron las tres muestras descritas anteriormente y cada 24 horas aproximadamente se hicieron las mediciones de pH y °Bx, también se registró el porcentaje de cambio máximo con relación al día 0 y al día anterior, los resultados se muestran en la
-
- Tabla 11.

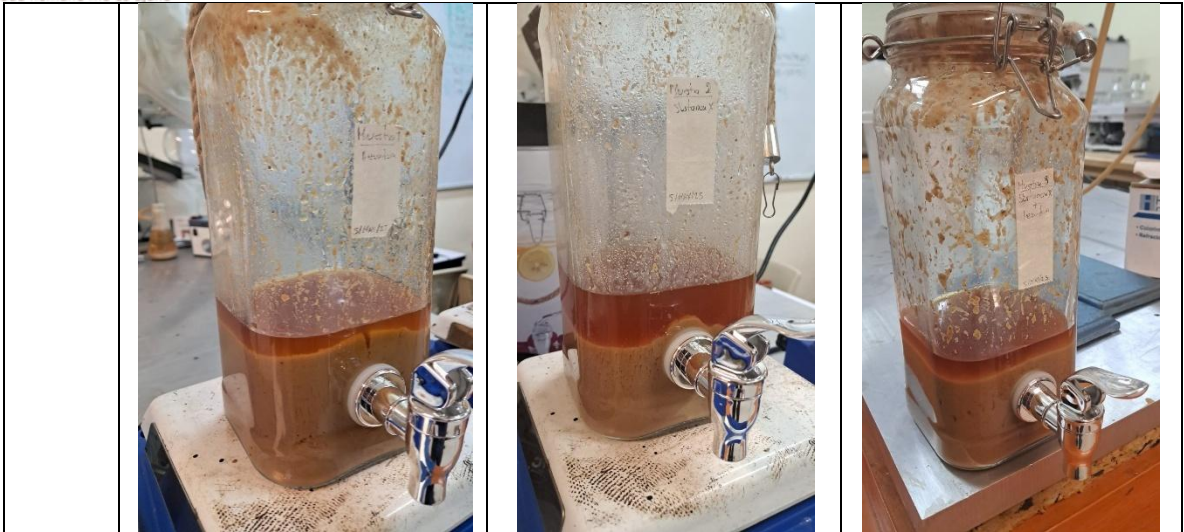
Tabla 11 Histórico de valores de la fermentación.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
	580 ml de agua potable + Sustrato de Mezquite	580 ml de agua + Sustrato de Mezquite 1:20 + 17.4 ml de	580 ml de agua + Sustrato de Mezquite 1:20 + 8.7 ml

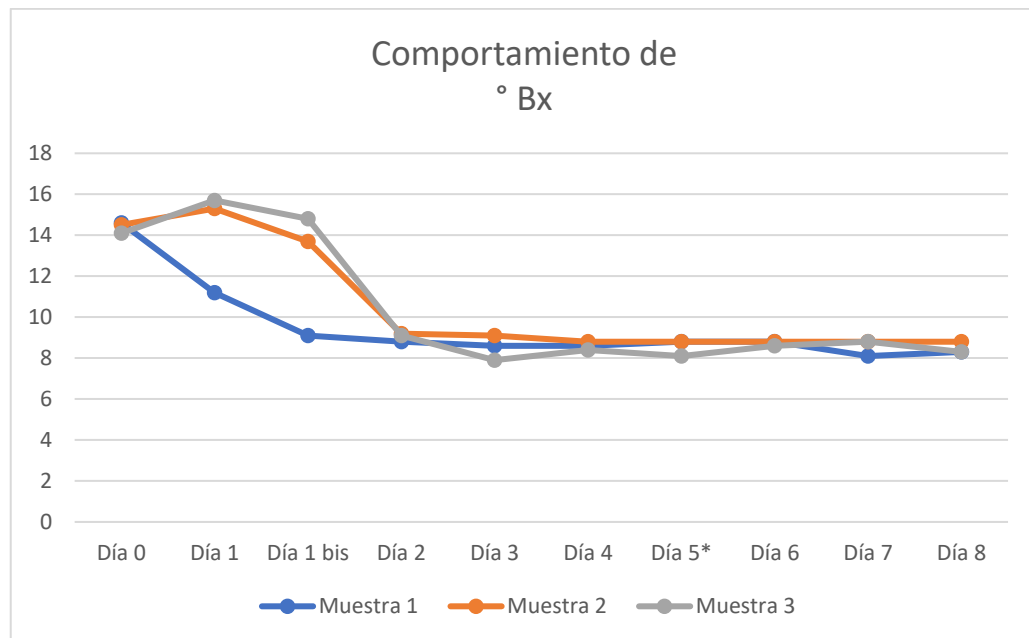


	1:20 + 17.4 ml levadura activada	asiento de pulque activado	levadura + 8.7 ml asiento de pulque activadas.
Día 0	14.4-14.6 °Bx	14.4-14.5 °Bx	13.9-14.1 °Bx
Día 1 12:45 pm.	11.2-11.4°Bx / 4.5 – 4.8 pH (-23.28 % max)	15.3 °Bx / 4.5 – 4.8 pH (+5.51 % max)	15.7-15.9 °Bx / 4.5 – 4.8 pH (+14.38 %)
Día 1 6:45 pm.	9.1-9.3°Bx (-20.17 % max.) (-37.67 % acumulado) 4.5 pH 	13.7-13.8 °Bx (n/a) (-5.51 % acumulado) 4.8 pH 	14.8-15.0°Bx (n/a.) (n/a) 4.8 pH 
Día 2.	8.8- 9.0°Bx (-5.37 % max.) (-39.72 % acumulado) 4.5 pH	9.2-9.4°Bx (-33.33 % max.) (-36.55 % acumulado) 4.4-4.5pH	9.1-9.2°Bx (-39.33 % max.) (-35.46 % acumulado) 4.5-4.8 pH
Día 3.	8.6-8.8 °Bx (-4.44 % max.) (-41.09 % acumulado) 4.8 pH	9.1-9.2 °Bx (-3.19 % max.) (-40.52 % acumulado) 4.0 pH	7.9 – 8.5 °Bx (-14.13 % max.) (-50.3 % acumulado) 4.3 pH
Día 4.	8.6-8.8 °Bx (-3.15 % max.) (-41.09 % acumulado) 3.9 -4.1 pH	8.8 °Bx (-4.34 % max.) (-42.48 % acumulado) 3.9-4.1 pH	8.4-8.6 °Bx (-1.17 % max.) (-47.16 % acumulado) 3.8-4.0 pH

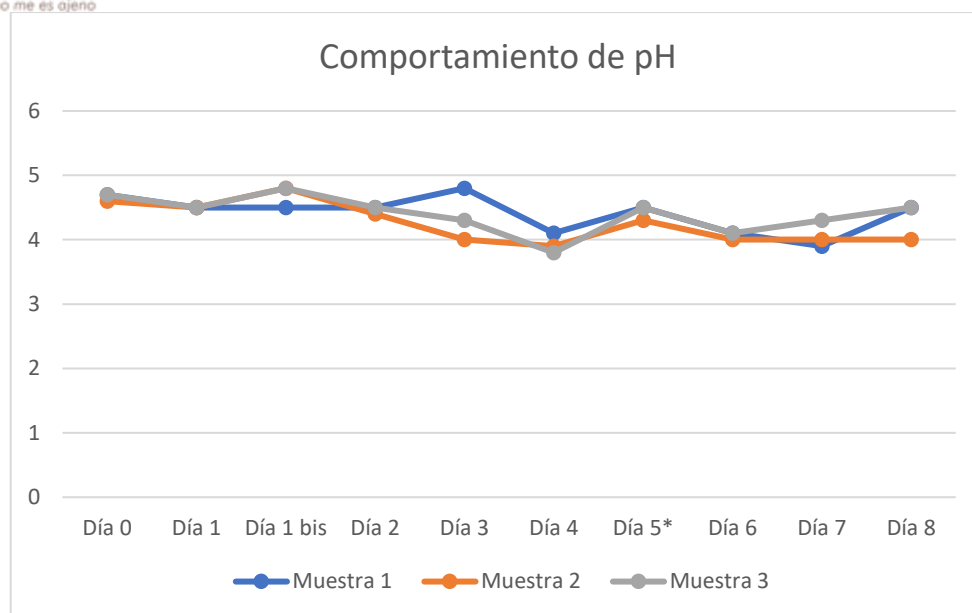
			
Día 5.	8.8-8.9 °Bx (-2.22 % max.) (-39.72 % acumulado) 4.5 pH	8.8-8.9 °Bx (-5.37 % max.) (-42.48 % acumulado) 4.3 pH	8.1-8.2 °Bx (-3.57 % max.) (-50.94 % acumulado) 4.5 pH
Día 6.	7.6-8.3 °Bx (-15.5 % max.) (-47.94 % acumulado) 4.0-4.3 pH	8.8-9.1 °Bx (-1.12 % max.) (-42.4 % acumulado) 4.0-4.2 pH	8.6-8.9 °Bx (+6.8 % max.) (-45.91 % acumulado) 4.1-4.2 pH
Día 7.	8.1-8.5 °Bx (-2.40 % max.) (-44.52 % acumulado) 3.9-4.0 pH	Se detuvo la fermentación y se procedió al destilado.	8.8-8.9 °Bx (+2.32 % max.) (-44.65 % acumulado) 4.3-4.5 pH
Día 8.	8.3-8.5 °Bx (+2.46 % max.) (-43.15 % acumulado) 4.5 pH Se detuvo la fermentación y se procedió al destilado.		8.3-8.4 °Bx (-6.74 % max.) (-47.79 % acumulado) 4.5 pH Se detuvo la fermentación y se procedió al destilado



- El comportamiento de los valores de °Bx y de pH se muestran en la Gráfica 1 y Gráfica 2.



Gráfica 1 Histórico de °Bx con diferentes microorganismos



Gráfica 2 Histórico de pH con diferentes microorganismos.

- Una vez que se decidió que el proceso de fermentación había terminado, se continuó con el proceso de destilación, el cual tuvo una duración de 2 horas en promedio. Los resultados y el producto obtenido se muestran en la
- Tabla 12.

Tabla 12 Producto obtenido.

Muestra 1 Disolución de Agua + Sustrato de Mezquite + Levadura	Muestra 2 Disolución de Agua + Sustrato de Mezquite + Asiento de Pulque	Muestra 3 Disolución de Agua + Sustrato de Mezquite + Levadura + Asiento de Pulque
• Alcohol obtenido: 38 ml. • Grados de alcohol: 63°	• Alcohol obtenido: 31 ml. • Grados de alcohol: 71°	• Alcohol obtenido: 30 ml. • Grados de alcohol: 71°

- Se realizó una segunda destilación combinando el producto de las tres muestras para mejorar la pureza de la solución. En esta segunda destilación los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de la segunda destilación

	Al iniciar la segunda destilación	Al finalizar la segunda destilación
Cantidad de la mezcla.	74 mL	45 mL
Grado alcohólico.	65 °	93 °

Conclusiones.

El presente estudio permitió evaluar la viabilidad de la vaina de *Prosopis laevigata* como materia prima para la producción de bioetanol, considerando pretratamientos físicos, procesos fermentativos y etapas de purificación del producto obtenido. A partir de los resultados experimentales, se concluye lo siguiente:

1. El contenido de humedad natural de la vaina de mezquite se encuentra en un intervalo de 10 a 15 %, lo cual permite su acondicionamiento mediante pretratamiento mecánico sin requerir procesos de secado energéticamente intensivos. Se determinó que las primeras 24 horas de secado, a temperaturas entre 75 y 80 °C, representan el periodo más eficiente para la reducción de humedad.
2. El pretratamiento hidrotermal resultó ser el más adecuado para la liberación de azúcares fermentables, ya que tiempos mayores de exposición, manteniendo temperaturas no superiores a 80 °C y utilizando recipientes cerrados, incrementaron los valores de sólidos solubles hasta en un 25 %, alcanzando concentraciones cercanas a 15 °Bx, consideradas óptimas para procesos de fermentación alcohólica.
3. El pretratamiento ácido fue descartado como una alternativa viable, debido a que no generó incrementos significativos en los °Bx y requirió procesos posteriores de neutralización, lo que incrementó los costos operativos y produjo un medio salino desfavorable para la actividad metabólica de las levaduras y bacterias utilizadas en la fermentación.
4. El análisis por espectroscopía FTIR permitió identificar señales compatibles con la presencia de grupos funcionales asociados a carbohidratos fermentables. En particular, el mezquite en estado de descomposición mostró un perfil espectral con mayor probabilidad de generar alcohol, lo que lo posiciona como un sustrato prometedor para fermentación alcohólica. No obstante, esta interpretación se considera semi-cuantitativa, por lo que se recomienda su validación mediante técnicas analíticas complementarias, como HPLC o ensayos enzimáticos específicos.
5. El análisis microscópico de las muestras de pulque evidenció que el “agua miel” presenta una baja concentración microbiana, mientras que el pulque madre o pie de pulque contiene una población significativamente mayor y más diversa de

- microorganismos, motivo por el cual fue seleccionado como inóculo para los procesos fermentativos.
6. Durante la fermentación, las levaduras comerciales mostraron un consumo rápido de azúcares, reflejado en una disminución acelerada de °Bx, mientras que los microorganismos nativos del pulque presentaron una cinética fermentativa más lenta, con una reducción aproximada del 45 % de los °Bx iniciales. En todos los casos, el pH se mantuvo estable entre 4.0 y 4.5, y las muestras convergieron hacia una fase de estabilidad metabólica a partir del segundo día de fermentación.
 7. El proceso de destilación permitió obtener etanol con grados alcohólicos entre 63° y 71°, considerados aceptables para una primera etapa de purificación. Una segunda destilación incrementó la pureza hasta un 93 %, valor cercano al 99.5 % requerido por la normativa vigente, por lo que la incorporación de tamices moleculares se perfila como una alternativa viable para alcanzar el grado de pureza normativo.
 8. A partir de 200 g de harina de mezquite, se obtuvo en promedio 35 mL de etanol al 70 %, lo que equivale a un rendimiento aproximado del 17.5 % del producto fermentado. Extrapolando estos resultados, se estimó que una tonelada de vaina de mezquite, considerando su composición promedio (10 % agua, 35 % cáscara y 55 % sustrato efectivo), permitiría obtener 57.75 litros teóricos de bioetanol normativo, equivalente a una eficiencia global del 5.77 % respecto a la vaina completa.
 9. Cuando se considera exclusivamente la harina de mezquite como sustrato, el rendimiento se incrementa hasta un 10.5 % de bioetanol, lo que corresponde a 105 litros de etanol, suficientes para oxigenar aproximadamente 1,810 litros de gasolina, conforme a la legislación vigente.
 10. Adicionalmente, se identificó que entre el 35 % y 45 % de la vaina corresponde a residuos ricos en lignina y celulosa, los cuales representan un potencial energético y tecnológico significativo para futuras investigaciones, incluyendo su uso en bioenergía sólida, obtención de subproductos o aprovechamiento del CO₂ generado durante la fermentación.
 11. Finalmente, considerando un escenario regional para el estado de Hidalgo, donde se estiman 8,343,700 árboles potencialmente aprovechables, y asumiendo una explotación conservadora del 30 %, se proyecta una producción anual aproximada de 7.2 millones de litros de bioetanol. Aunque este volumen representaría apenas el 0.739 % del consumo nacional de gasolinas, evidencia un amplio margen de oportunidad para optimizar procesos, escalar la tecnología y diversificar materias primas orientadas a mejorar la calidad de los combustibles en México.

Índice de imágenes.

Imagen 1-1. Distribución de fuentes de energía en tres diferentes escenarios. (Agencia Internacional de la Energía, 2024).....	9
Imagen 1-2. Generación de CO2 per capita proyectad. (Agencia Internacional de la Energía, 2024)...	10
Imagen 1-3. Distribución de biocombustibles en dos escenarios posibles. (IRENA, 2023)	12
Imagen 1-4. Comparativo de producción mundial vs nacional.....	13
Imagen 1-5. Comparativa de consumo energético a nivel mundial vs nacional.....	14
Imagen 1-6. Evolución de generación de energía renovables.	18
Imagen 1-7. Distribución de Prosopis en suroeste de Estados Unidos.....	27
Imagen 1-8. Distribución de Prosopis noroeste de México.	27
Imagen 1-9. Distribución de Prosopis en Norteamérica y Centroamérica de Prosopis laevigata.	28
Imagen 1-10. Distribución Prosopis globusum y reptans en Suramérica.	28
Imagen 2-1. Estructura de la biomasa lignocelulósica. (Cortes, 2014)	33
Imagen 3-1. Vainas del mezquite seleccionadas.....	41
Imagen 3-2. Vainas del mezquite desechadas.	41
Imagen 3-3. Pretratamiento mecánico.	42
Imagen 3-4. Espectros de infrarrojo en modo absorbancia correspondiente a tres muestras de mezquite.	44
Imagen 3-5. Arreglo para destilación.....	47
Imagen 4-1. Pruebas de Benedict (A) y Fehling (B).....	49
Imagen 4-2. Imagen de microscopio de una muestra de “Agua Miel”	52
Imagen 4-3. Imagen de microscopio de una muestra de “Pie de Pulque”.	53
Imagen 4-4. Imagen de microscopio de una muestra de “pulque bebible”.	53
Imagen 4-5. Activación de levadura con harina de mezquite (A) y azúcar refinada (B).	54

Índice de tablas.

Tabla 1. Capacidad instalada en México	17
Tabla 2. Capacidad instalada por modalidad y tipo de tecnología	17
Tabla 3. Generación de bioenergía 2018-2022	18
Tabla 4. Punto de inflamación del etanol.....	32
Tabla 5. Secado de la vaina de mezquite, 1er experimento.....	48
Tabla 6. Secado de mezquite, 2o experimento.....	49
Tabla 7 Resultados de un primer pretratamiento hidrotermal a una solución de harina de vaina de mezquite.....	50
Tabla 8 Resultados de un segundo pretratamiento hidrotermal a una solución de harina de vaina de mezquite.....	51
Tabla 9 Pretratamiento en medio ácido del sustrato de la vaina de mezquite.....	51
Tabla 10 Experimento para neutralizar el compuesto con elementos básicos.....	51
Tabla 11 Histórico de valores de la fermentación.....	54
Tabla 12 Producto final obtenido.	58

Referencias bibliográficas

1. Agencia Internacional de la Energía. (2024). *World Energy Outlook*. IEA – International Energy Agency. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
2. CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, Nueva Ley DOF 01-02-2008. (2008). *LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS*.
3. CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, Nueva Ley DOF 18-03-2025. (2025). *LEY DE BIOCOMBUSTIBLES*.
4. CARDONA, C. A., SÁNCHEZ, Ó. J., MONTOYA, M. I., & QUINTERO, J. A. (2005). SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR Y MAÍZ. *Scientia et Technica*(28), 187-192.
5. Cervantes-Contreras, M. &. (2008). Caracterización microbiológica del pulque y cuantificación de su contenido de etanol mediante espectroscopia Raman. *Superficies y vacío*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-35212008000100001&lng=es&tlng=es.
6. Compañía Minera y Beneficiadora Purísima, S de R. L. (2002). *Construcción y Operación de una Planta de Beneficio de Minerales Metálicos (plomo, cobre y zinc.)*.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/hgo/estudios/2002/13HI2002M0012.html>
7. Cortes, O. W. (2014). Tratamientos Aplicables a Materiales Lignocelulósicos para la Obtención de Etanol y Productos Químicos. *Revista de Tecnología*, 39-44.
8. Daniel, M., Tania, O., & Valdez, R. (2015). *El Mezquite (Prosopis laevigata) alternativa económica para el Valle del Mezquital*. Hidalgo, México.: Centro Educativo Cruz Azul.
9. Delgado, M. D. (2009). *EVALUACIÓN TECNICO-ECONOMICA DE LA OBTENCION DE ETANOL A PARTIR DE LA YUCA*.
10. Duarte-Zaragoza, V. M., Pérez-Hernández, V. S., Hernández-Acosta, E., & Villanueva-Morales, A. (22 de diciembre de 2020). Estudio exploratorio de la acumulación de plomo y cobre en Prosopis laevigata en depósitos mineros. Ecosistemas y recursos agropecuarios.
11. Facultad de Química, UNAM. (05 de 2008). <https://quimica.unam.mx/>. Obtenido de <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2008/05/12etanol.pdf>
12. Fanny Olivia Reveles, S., Rigoberto Rosales, S., Cynthia Adriana, N. B., Efrén, D. L., Evenor Idilio, C. R., Francisco Óscar, C. C., & Julio César, R. S. (2010). Identificación de especies vegetales con potencial para la producción de biocombustibles líquidos en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 45-54.

13. Fernández E., J. &. (2010). Obtención de biogas a partir de bagazo de caña y estiércol. 105-118.
14. García-Azpeitia, L., Montalvo-González, E., & Loza-Cornejo, S. (2022). Caracterización nutricional y fitoquímica de hojas, flor y fruto de *Prosopis laevigata*. *Botanical Sciences*, 1014-1024.
<https://doi.org/https://doi.org/10.17129/botsci.3000>
15. Gobierno de México. (2025). *Anuario estadístico Pemex 2024*.
16. Godínez-Cortés, S., Romero Nápoles, J., & Castellanos, I. (2017). Especies de la familia Bruchidae (Coleoptera) en Zimapán, Hidalgo, México: nuevos registros, hospederos y clave para su identificación. *Acta zoológica mexicana*, 266-313.
17. Instituto Mexicano del Petróleo. (2017). *Reporte de inteligencia Tecnológica, Bioetanol*.
18. IRENA. (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
19. Juana, J.-M., Guillermo, C.-C., & Abraham, R. (2006. Vol. 23). Estimación del polimorfismo en dos poblaciones de mezquite (*Prosopis laevigata*) mediante RAPD. *Biotecnología Aplicada* , 229-235.
20. M. en C. Luis, D. B. (2019). *Valor Nutrimental de harinas de vaina de Mezquite (Prosopis Laevigata) y efecto de su consumo en un alimento obtenido por extrusión sobre el desarrollo de dislipemia en ratón*. San Agustín, Tlaxiaca, Hgo. México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
21. Manuel J, S. (2013). *Factibilidad del uso de aceite de mezquite para la producción de biodiesel*. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro".
22. Mendoza-Espinoza J.A., M.-Q. J.-O.-M.-F.-P. (2015). MOLECULAR IDENTIFICATION OF YEAST OF THE PULQUE BY PCRDGGE, A TRADITIONAL MEXICAN BEVERAGE. *INTERNATIONAL JOURNAL of RESEARCH –GRANTHAALAYAH*, 3(3), 1-15.
23. Morales-Reyna, A. P.-G.-M.-S.-R. (2026). Structural, spectroscopic and bioactivity insights of rutin. *Journal of Natural Products and Phytochemistry*, 145–158. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jnpp.2026.03.007>
24. Morán Guillén, H. A., Faneite Noguera, A. M., Salones Chirino, G. d., Gamez Gerdez, J. V., & Ferrer Ocando, A. d. (2017). Biorrefinación del fruto del *Prosopis juliflora* para producción de etanol. Evaluación de las etapas de acondicionamiento y pretratamiento. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, 169-183.
25. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Buenos Aires, Argentina. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*.
26. Palacios, R. A. (2006). Los Mezquites Mexicanos: Biodiversidad y Distribución Geográfica. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 99-121.

27. Palacios, R. A., Jiménez Muñoz, E., & Rodríguez Laguna, R. &. (2021). Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. en el estado de Hidalgo, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*.
28. Presidencia de la República. (25 de febrero de 2014). <https://www.gob.mx/epe/>. Obtenido de <https://www.gob.mx/epe/articulos/uso-sustentable-del-agua>: <https://www.gob.mx/epe/articulos/uso-sustentable-del-agua>
29. PRODESEN, Secretaría de Energía, SENER. (2023). *Programa de Desarrollo de Sistema Eléctrico Nacional, 2023-2037, PRODESEN*.
30. Renewable Fuels Association . (2024). *Annual Ethanol Production*. Obtenido de <https://ethanolrfa.org/>: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>
31. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica. (2025). Perspectivas Energéticas, el panorama de los biocombustibles. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*.
32. Rodríguez Saucedo, E., Rojo Martínez, G., Ramírez Valverde, B., Martínez Ruiz, R., Cong Hermida, M., Medina Torres, S., & Piña Ruiz, H. (2014). ANÁLISIS TÉCNICO DEL ÁRBOL DEL MEZQUITE (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) EN MÉXICO. *Ra Ximhai*, 173-193.
33. Rossana del Carmen, A.-F. (2020). Uso del mezquite (*Prosopis* spp.) como recurso alimenticio. *Handbooks Mujeres en la Ciencia*, 130-147.
34. Rzedowski, J. (1988). Analisis de la Distribucion Geográfica del complejo *Prosopis* en Norte America. *Acta Botánica Mexicana*, 3:7-19.
35. Salinas, C., & E., &. G. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, (157), 75-82.
36. Sciammaro, L., Cristina, F., & Cecilia, P. (2015). Agregado de valor al fruto de *Prosopis alba*. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 115-123.
37. Secretaria de Energía, México. (2023). *Balance Nacional de Energía*.
38. Secretaría de Energía, SENER. (2015). *Centros Mexicanos de Innovación en Energía*. Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia>
39. Secretaría de Energía, SENER. (2016). *Prospectiva de Energías Renovables, 2016-2030*. México: Secretaría de Energía, SENER. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energ_as_Renovabl es_2016-2030.pdf
40. Silva, C. G., Samara A., C. A., Alexandre R, . P., Evandro, L. d., & Stamford4, T. L. (2011). Production of ethanol from mesquite [*Prosopis juliflora* (SW)]. *Sci. Agric*, 124-127.
41. United Nations. (2021). *Report of the High-Level Dialogue on Energy*. New York.

42. Universidad de Sevilla. (2006). *PRODUCTOS DERIVADOS DE LA BIOMASA*. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/use/abreproy//fichero/20234%252FCap%C3%ADtulo+2%252Fcap2.pdf>
43. Vargas, V. M., Mayorga, D. F., Álvarez, M. P., & Espinoza, J. P. (2022). Los biocombustibles como alternativa de energía a partir de recursos renovables y/o desechos. *Polo del conocimiento*, 386-407. Obtenido de <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es>
44. Zalduegui, P. C. (1975). Complementos de Bioquímica, Industrias Agrícolas. *BIOQUÍMICA DE LAS FERMENTACIONES*. Madrid., España: E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de Madrid.- Ciudad Universitaria.-.