



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL
BAGAZO DE AGAVE ESPADÍN (*A.
angustifolia*)”**

Tesis

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

ALAN ALDAIR REYES HERNÁNDEZ

Director de Tesis:

Dr. Adán Luna Flores

Puebla, Pue. 2023

QUÍMICA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fortaleza y la guía espiritual necesaria para superar los desafíos y encontrar sentido en este camino.

A mis padres, Elena y Felipe por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios que hicieron para que pudiera llegar hasta aquí. Su ejemplo de dedicación y esfuerzo siempre me inspira.

A mi hermano Axel, por ser mi fuente de ánimo y un amigo fiel a lo largo de esta travesía.

A mis abuelos, Venancio, Teresa, Josefa y Margarito, por su todo su cariño, consejos y apoyo. Por ser unos seres admirables.

A mis amigos, Mario, Anylu, Fernando, Alfonso y Alex, quienes han estado a mi lado, brindándome su amistad y aliento en cada paso del camino. Su compañía hizo más llevadera y divertida esta travesía. A mis amigos Carlos y Corina por estar siempre presentes.

A mi director de tesis, Dr. Adán Luna Flores, por su orientación experta, paciencia, y por compartir su conocimiento conmigo. Sin su guía, este trabajo no habría sido posible.

A los sinodales y profesores Ángel Silveti y Antonio Bonilla por dedicar su tiempo y conocimientos en la evaluación de mi tesis. Sus comentarios y sugerencias han enriquecido enormemente este trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	8
JUSTIFICACIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	9
HIPÓTESIS	10
CAPITULO I. ANTECEDENTES.....	10
Maguey Espadín (<i>Agave angustifolia</i>).....	10
Producción de mezcal.....	12
Bagazo de agave (<i>A. Angustifolia</i>).....	15
Posibles usos y aplicaciones del bagazo de agave.	16
Bioetanol.	17
Producción de Bioetanol	17
CAPITULO II METODOLOGÍA	23
Fase 1.	24
Obtención de la materia Prima.	24
Caracterización de la materia prima.	24
Pretratamiento de Materia prima.....	25
Hidrolisis enzimática.	26
Métodos de prueba para determinación de azúcares presentes.	28
Fermentación	30
Fase 2.....	32
Pretratamiento de la materia prima	32
Hidrolisis enzimática	33
Fermentación.	36
Destilación.....	37
CAPITULO III. DISCUSIÓN Y RESULTADO	40
Muestras obtenidas.	40
Resultados de Fermentación.....	41
Determinación del % de etanol con curva de calibración de Uv-vis.	42
Determinación del % de etanol con curva de calibración de la densidad.	44

CAPITULO IV. CONCLUSIONES.....	53
Propuesta de valorización del residuo del bagazo de Agave Angustifolia.....	53
Fabricación de Carbón Activado.....	54
Fuente como Combustible vegetal	55
Compostaje de los residuos de bagazo y su utilización como biofertilizante.....	56
Alimento para rumiantes	57
BIBLIOGRAFÍA	59

Índice de Figuras

Fig. 1 Agave angustifolia o Maguey espadín. Fuente: Santiago Barreido.....	10
Fig. 2 Producción de Mezcal en las DOM en litros por año: Fuente COMERCAN 2022.....	12
Fig. 3 Estados con Denominación de Origen del Mezcal fuente: COMERCAM.....	13
Fig. 4 Bagazo de Agave seco, Facultad de Química UNAM	15
Fig. 5 Esquema del proceso básico de elaboración de Bioetanol, Fuente propia en base a fuentes consultadas.	18
Fig. 6 Bagazo residual en un palenque, Matatlán Tlacolula Oaxaca. Fuente propia.	24
Fig. 7 Cocción de las piñas de agave.	26
Fig. 8 Enzima Celulasa Ácida	26
Fig. 9 Procedimiento de la Hidrolisis	27
Fig. 10 Medición de pH y parámetros adecuados para la hidrolisis enzimática	27
Fig. 11 Refractómetro utilizado en la medición de grados Brix	28
Fig. 12 Procedimiento del método de prueba de azul de metileno	30
Fig. 13 Levadura comercial <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	30
Fig. 14 Etapa de fermentación	31
Fig. 15 Equipo de destilación utilizado.....	32
Fig. 16 Secado de la materia prima	33
Fig. 17 Triturado del bagazo de agave seco	33
Fig. 18 Dosificación de la enzima y medición de pH	34
Fig. 19 Hidrolisis enzimática de la fase 2.....	35
Fig. 20 Medición de Grados brix en el hidrolizado de la Fase 2	35
Fig. 21 Prueba de Azul de Metileno para Fase 2	36
Fig. 22 Proceso de Fermentación a 40 °C durante 7 y 15 días	36
Fig. 23 Destilación en la Fase 2.....	37
Fig. 24 Muestras obtenidas en ambas fases	37
Fig. 25 Espectrofotómetro UV- vis utilizado para el análisis de las muestras.....	38
Fig. 26 Medición de la densidad en las muestras obtenidas.....	39
Fig. 27 Grafica de Barrido UV-vis Muestra A, B y C y una muestra de Etanol al 100 %	42
Fig. 28 Gráfico de Barrido UV-vis muestras D, E y F y muestra de etanol al 100%	43
Fig. 29 Grafico de Barrido de UV. Vis muestras G, H e I y muestra de etanol al 100%	43
Fig. 30 Curva de Calibración de Densidad - Concentración en % de Etanol a 20°C	45
Fig. 31 Grafico de concentración de etanol en cada muestra a 20° C	48
Fig. 32 Grafico del rendimiento de materia prima en estudios previos realizados vs muestra obtenida.	52
Fig. 33 Residuos Resultantes de la obtención de Bioetanol.....	54

Índice de tablas

Tabla 1 Producción de mezcal por especie de agave utilizada en 2021.	11
Tabla 2 Cantidad de bagazo generado por año en toneladas.....	16
Tabla 3 Principales usos del bagazo de agave. Fuente: (Gonzales, Gonzales, & Nungaray, 2005)	16
Tabla 4 Ventajas y desventajas de la hidrolisis enzimática y ácida. Fuente (Tejada, Quintana , & Pérez, 2011)	21
Tabla 5 Propiedades Fisicoquímicas del bagazo de Agave	24
Tabla 6 Muestras.....	40
Tabla 7 Grados Brix de las muestras antes y después de la Hidrólisis y Prueba de Azul de metileno.	41
Tabla 8 Cantidad obtenida de cada muestra en ml después de la destilación.....	41
Tabla 9 Concentración y densidad del etanol a 20°C.	44
Tabla 10 Resultados de la medición de la densidad en cada muestra.....	46
Tabla 11 Concentración en % de alcohol a 20°C en cada muestra obtenida.	47
Tabla 12 Volumen de etanol obtenido en cada muestra.	50

INTRODUCCIÓN

En un mundo que busca continuamente alternativas sostenibles y renovables para satisfacer las demandas energéticas y enfrentar los desafíos del cambio climático, la búsqueda de fuentes de energía limpias y eficientes se ha convertido en una prioridad en diversos ámbitos. Entre estas alternativas, el etanol se ha destacado como un biocombustible prometedor, capaz de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de este contexto, la utilización del bagazo de agave de mezcal como materia prima para la producción de etanol surge como una opción atractiva, enriquecida por la rica tradición y vasto cultivo de agave en el estado de Oaxaca, México.

El bagazo de agave, un subproducto de la industria mezcalera ha sido históricamente subestimado como residuo, relegado en gran parte como desecho agrícola. Sin embargo, este material posee un potencial considerable como fuente de biomasa para la generación de biocombustibles, en particular, el etanol. La agroindustria del mezcal en Oaxaca produce una cantidad significativa de bagazo de agave cada año, lo que plantea la oportunidad de transformar este residuo en una fuente valiosa de energía renovable y reducir al mismo tiempo los desafíos ambientales y económicos asociados con su eliminación.

Esta investigación se enfoca en explorar y evaluar la viabilidad técnica de la producción de etanol a partir del bagazo de agave obtenido de la producción de mezcal en el estado de Oaxaca. Se busca analizar cada etapa del proceso, desde la recolección y preparación del bagazo hasta la obtención del etanol, considerando factores tales como la composición química del material, los métodos de extracción y fermentación. Además, se pretende destacar cómo esta iniciativa podría contribuir no solo a la diversificación de la matriz energética regional, sino también al fortalecimiento de la industria mezcalera local y a la reducción de su huella ambiental.

En última instancia, esta tesis aspira a contribuir al creciente cuerpo de conocimiento sobre la utilización de recursos locales para abordar problemáticas ambientales y aportar a la creación de un futuro más sustentable y resiliente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La industria mezcalera en Oaxaca ha tenido un desarrollo progresivo en los últimos años convirtiéndose actualmente en la principal industria en este Estado. De acuerdo con la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas el 90.1% del mezcal elaborado a nivel nacional es de producción oaxaqueña. (Flores Ríos, Robles, & Castañeda, 2020).

Derivado de la producción del mezcal son generados diversos residuos agroindustriales en los que destacan las hojas del agave, bagazo y vinaza. Estos residuos representan un problema significativo al medio ambiente debido a sus grandes volúmenes de generación, así como la falta de tratamiento y una disposición final adecuada.

Los principales impactos ambientales de estos residuos son la contaminación de cuerpos de agua tales como ríos, presas, mantos acuíferos y freáticos, contaminación del suelo y cambio de sus propiedades tales como la acidificación. (Gallardo , 2017).

En este sentido el bagazo de maguey es un residuo fibroso lignocelulósico, cuya generación representa un volumen muy alto. Masaguer y col (Masaguer , Gomez , Cámara, Zárate, & Eymar , 2014) aluden que la producción de este residuo se estima en 624000 toneladas anuales tan solo en el estado de Oaxaca. Este residuo proviene principalmente del maguey espadín (*Agave angustifolia*), puesto que este agave es el más utilizado por la industria mezcalera en este Estado.

Flores Ríos y col. (Flores Ríos, Robles, & Castañeda, 2020) mencionan que en Oaxaca el bagazo de agave no es aprovechado, valorizado y escasamente es tratado para una disposición final adecuada, solo es vertido en ríos, arroyos, así como amontonado fuera de los palenques y parcelas.

De acuerdo con la NOM-161-SEMARNAT-2011, (Norma Oficial Mexicana , NOM-161-SEMARNAT-2011, 2011) tanto los agroplásticos como los residuos orgánicos son considerados residuos de manejo especial y están sujetos a Planes de Manejo, es por ello que es necesario implementar investigaciones y procesos para poder dar tratamientos adecuados a estos residuos, así como poder valorizarlos puesto que son una fuente potencial de materia prima.

Para el caso del agave se ha estudiado las posibles aplicaciones de este residuo, Sierra y col. (Sierra, Alcaraz, Valvidia, & Rosas , 2021) destaca la producción de biocombustibles a partir de este residuo debido a su gran contenido de hexosas,

azúcares de cinco y seis carbonos los cuales favorecen los procesos fermentativos. De igual forma el uso del bagazo de agave ha cobrado importancia para la obtención de productos de interés industrial como biopolímeros, biocombustibles, tensoactivos y quelantes entre otros, debido a que sus compuestos pueden ser convertidos por métodos biotecnológicos o químicos en otras moléculas de utilidad, que le otorgan un valor agregado al desecho.

JUSTIFICACIÓN

Debido a los grandes volúmenes de generación de bagazo de agave como residuo en la producción de mezcal, es necesario buscar alternativas de tratamiento, valorización y disposición final adecuada, puesto que genera un impacto ambiental negativo al medio ambiente. Es por tanto que esta tesis busca emplear este residuo para la elaboración de bioetanol puesto que se ha comprobado que es una fuente potencial de materia prima para el desarrollo de biocombustibles, ayudando así a la valorización de este residuo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Obtención de bioetanol a partir del bagazo de Agave espadín (*Agave angustifolia*)

Objetivos particulares

Conocer la composición y propiedades fisicoquímicas del bagazo de agave angustifolia

Establecer las condiciones de fermentación de acuerdo con la cantidad de bagazo a emplear.

Llevar a cabo la recuperación de bioetanol.

Conocer el rendimiento del etanol obtenido.

HIPÓTESIS

Es posible la producción de bioetanol a partir del bagazo de maguey espadín (*Agave angustifolia*).

CAPITULO I. ANTECEDENTES

Maguey Espadín (*Agave angustifolia*)



Fig. 1 Agave angustifolia o Maguey espadín. Fuente: Santiago Barreido, recuperado de [Agave angustifolia, el de las hojas estrechas - \(mezcolgia.mx\)](#)

Agave angustifolia (Fig.1) conocida comúnmente como maguey espadín es una planta que se caracteriza por sus hojas alargadas y cogollos que se extienden en forma de espiral sobre su tallo formando de este modo una roseta.

Hidalgo y col. (Hidalgo, Caballero , & Hector , 2015) Describen a este agave con hojas rígidas y fibrosas de color verde a gris verdoso, con una longitud promedio de entre 110 a 130 cm, cuyo tallo varía entre los 70 a 90 cm de longitud, muestra también espinas laterales que oscilan de 2 a 5 mm de largo. Esta especie de agave es capaz de soportar condiciones ambientales adversas tales como alta temperatura, suelos moderadamente salinos y de baja fertilidad, así como también déficit hídrico. Su reproducción de forma sexual se da por medio de la propagación de semillas y de manera asexual por medio de la propagación de hijuelos de rizoma, los cuales deben ser plantados y cuidados para lograr su oportuno crecimiento (Ríos, Enríquez, Rodríguez, & Luna , 2021).

En el estado de Oaxaca el *Agave angustifolia* es el principal maguey utilizado por la industria mezcalera (Ver Tabla 1), esta especie es preferida debido a las ventajas genéticas que posee, es capaz de producir piñas de mayor tamaño en comparación con otros agaves silvestres aportando mayor materia prima, además de tener un ciclo de aprovechamiento que va de los 7 a 9 años en llegar a la madurez. (Cruz , Enríquez , Velasco, & Aquino , 2013)

tabla 1 Producción de mezcal por especie de agave utilizada en 2021.

AGAVE	%
MAGUEY ESPADÍN (<i>Agave angustifolia</i>)	88.11
MAGUEY CENIZO (<i>Agave durangensis</i>)	2.26
MAGUEY VERDE (<i>Agave salmiana</i>)	1.9
MAGUEY PAPALOTE (<i>Agave cupreata</i>)	1.29
MAGUEY TOBALÁ (<i>Agave potatorum</i>)	1.2
MAGUEY AZUL (<i>Agave tequilana</i>)	0.89
MAGUEY CUISHE (<i>Agave karwinskii</i>)	0.39
MAGUEY MANSO SAHUAYO (<i>Agave sp.</i>)	0.34
9 OTROS (86 Agaves diferentes) 3.62%	3.62

Producción de mezcal por especie de agave utilizada en 2021, 100% equivale a 8,099,591 litros. Fuente COMERCAN

De acuerdo con la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, el agave es considerado como un recurso forestal no maderable, de acuerdo con el Artículo 84 de la Sección Cuarta de dicha Ley su aprovechamiento requerirá un aviso por escrito a la autoridad competente, así mismo el Reglamento de esta Ley se establece que estos recursos deben someterse a un Programa de manejo forestal, así como una autorización de la Secretaría para su aprovechamiento conforme a los artículos 71, 72, 73, 74. Es por ello que es importante plantear un uso sustentable de este recurso.

Producción de mezcal

El mezcal es una bebida alcohólica que es obtenida artesanalmente de procesos de destilación de jugos fermentados extraídos de las cabezas o piñas de agave. De acuerdo con la COMERCAM (Consejo Mexicano Regulador Calidad del Mezcal) el cual es un organismo encargado de promover y vigilar el cumplimiento de la NOM-070-SCFI-2016, el mezcal cuenta con una Denominación de Origen (DOM) por lo que en conformidad con la Norma solo se permite la fabricación, producción y envasado en territorios que se encuentren en la DOM, así mismo el agave utilizado igualmente deberá proceder de estos mismos territorios.

Actualmente esta Denominación de Origen comprende 9 estados de la República mexicana los cuales son Oaxaca, Guerrero, 116 Municipios de Puebla, San Luis Potosí, Zacatecas, Durango, 2 Municipios de Guanajuato, 11 Municipios de Tamaulipas y 29 municipios de Michoacán. (Ver [Figura 3](#))

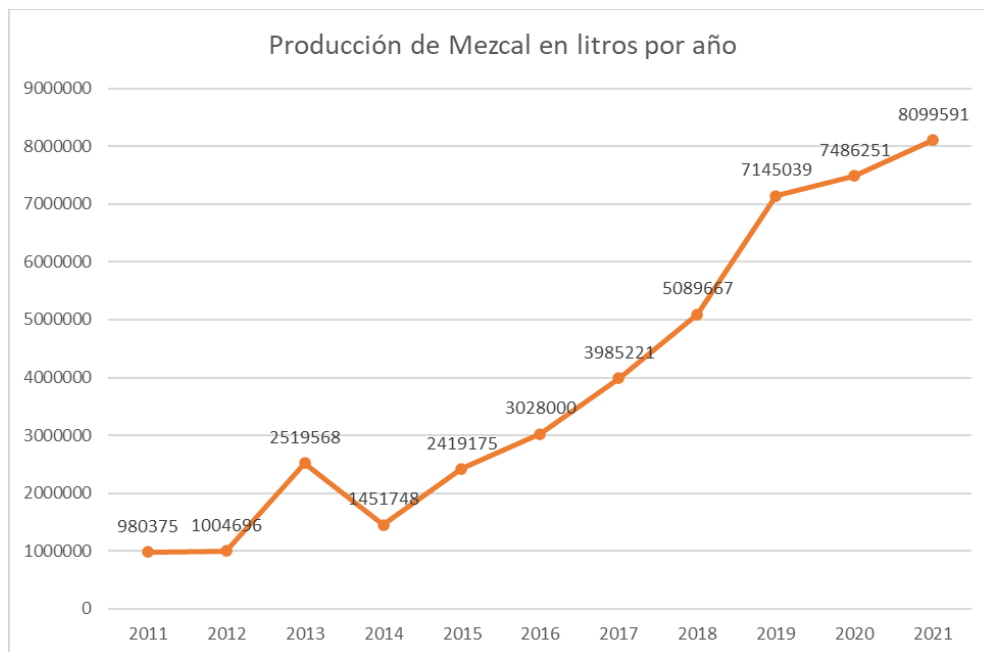


Fig. 2 Producción de Mezcal en las DOM en litros por año: Fuente COMERCAN 2022

De la producción total nacional en el año 2021 el 85.4 % se produjo en el estado de Oaxaca. (Ver figura 3)



Fig. 3 Estados con Denominación de Origen del Mezcal fuente: COMERCAM.

Producción del Mezcal

El proceso de producción del mezcal es considerado como una tradición centenaria por los pobladores de Santiago Matatlán, Tlacolula, municipio que es reconocido como “la capital mundial del mezcal” en el estado de Oaxaca, este proceso actualmente combina métodos artesanales con ciertas técnicas modernas para la obtención de esta icónica bebida. De acuerdo con Arellano Plaza. (ARELLANO PLAZA, 2022) esta producción se puede describir en 6 procesos diferentes, dependiendo de la zona en donde se fabrique.

Selección de materia prima:

El agave como hemos descrito anteriormente es la principal materia prima para la elaboración del mezcal, este proceso comienza con la selección y cosecha de las piñas maduras de agave, que son jimadas y posteriormente trasladadas al palenque para ser cocidas. En referencia a la NOM-016-SCFI-2016, la extracción de maguey está permitida por las autoridades competentes en apego a las leyes aplicables, así mismo menciona que el agave deberá proceder de regiones pertenecientes a la DOM, y se debe contar además con la guía del maguey durante el traslado de materia prima entre productores autorizados.

Cocimiento.

En esta etapa las piñas de agave son cocinadas, este proceso es sinónimo de una hidrólisis en donde los fructanos y almidones presentes en la materia prima son

convertidos a azúcares fermentables, esto se lleva a cabo tradicionalmente en hornos de piedra llamados palenques, en donde las piñas previamente cortadas son apiladas en capas, se cubren de hojas de agave y bagazo y se someten a cocimiento durante días, el principal combustible utilizado en esta etapa es la madera, aunque actualmente se ha comenzado a utilizar el gas licuado de petróleo y también el uso de autoclaves para acelerar el proceso.

Molienda

Después de la cocción, las piñas son trituradas con el objetivo de extraer los jugos de agave y fibras, esto ayudara a la extracción de azúcares durante la siguiente etapa que es la fermentación. Los equipos utilizados para la molienda permitidos por la NOM-070-SCFI-2016 son tahona, molino chileno o egipcio, trapiche, desgarradora, tren de molinos o difusor. El resultado de este proceso es una mezcla de mieles de agave, jugos y fibras conocidas como "bagazo".

Fermentación

Esta etapa es una de las etapas más importantes en la fabricación del mezcal pues de esta depende la calidad del producto final. El jugo, mieles y bagazo extraídos en la molienda son colocados en tinas de fermentación que pueden ser recipientes de madera, tanques de acero inoxidable y piletas de mampostería. La función de esta etapa es la transformación de azúcares en alcohol, se obtiene un líquido con contenido alcohólico llamado mosto.

La fermentación se lleva a cabo mediante procesos espontáneos que utilizan la microbiota nativa, es decir no se agregan levaduras, aunque esto está permitido por la Norma muy pocos productores agregan levaduras previamente preparadas. Verdugo Valdes y col. (Verdugo Valdez & Segura García, 2011) en su estudio de la fermentación del agave identificaron principalmente especies de "*Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces marxianus*, *Pichia kluyveri*, *Zygosaccharomyces bailii*, *Clavispora lusitaniae*, *Torulaspota delbrueckii*, *Candida ethanolica* y *Saccharomyces exiguus*" las cuales estaban presentes en esta importante etapa.

Destilación

El mosto obtenido en la fermentación es destilado en alambiques de cobre o de barro. Este proceso se realiza en dos etapas, en la primera el mosto y el bagazo es vertido en el alambique, posteriormente el líquido obtenido es nuevamente destilado en la fase dos, esto se hace para obtener un mezcal de mayor calidad y obtener el contenido de alcohol requerido.

Embotellado:

Después de la destilación y, en su caso, el envejecimiento, el mezcal se filtra, se diluye según la preferencia y se embotella. De acuerdo con la (Norma Oficial Mexicana, NOM-070-SCFI-2016, 2016) el proceso de envasado deberá cumplir 4 etapas y apegarse a los criterios sanitarios de envasado especificados en la NOM-142-SSA1/SCFI-2014 (Bebidas alcohólicas. Especificaciones sanitarias. Etiquetado sanitario y comercial)

- a) filtración del producto terminado.
- b) llenado;
- c) taponado, y
- d) sellado.

Bagazo de agave (*A. Angustifolia*)



Fig. 4 Bagazo de Agave seco, Facultad de Química UNAM, recuperado de [Buscar universitarios aprovechar residuos de la industria tequilera \(unam.mx\)](#)

El bagazo de agave (Fig. 5) es el residuo fibroso lignocelulósico que queda después del proceso de producción del mezcal u otras bebidas alcohólicas derivadas del agave. Este material consiste en las fibras y partes sólidas de las piñas que no se disuelven durante el proceso de cocción y molienda. El bagazo de agave tiene una textura similar a la pulpa y esponjosa, y generalmente contiene una cantidad significativa de humedad.

De acuerdo con Chávez (Chávez Guerrero L. , 2019) la producción de bagazo en base húmeda es de 15 a 20 kg por cada litro de mezcal producido. En tal sentido utilizando los datos de la COMERCAM en la que describe que la producción de mezcal en litros por año se realizó la Tabla 2, La cual describe la cantidad de toneladas de bagazo generadas por año de producción; suponiendo que la producción de bagazo fue de 20 kg por litro, ejemplificando esto en el año 2021 se generaron 161991.82 toneladas de bagazo.

Tabla 2 Cantidad de bagazo generado por año en toneladas.

Año	Litros de Mezcal producidos	Toneladas de Bagazo generadas
2011	980375	19607.5
2012	1004696	20093.92
2013	2519568	50391.36
2014	1451748	29034.96
2015	2419175	48383.5
2016	3028000	60560
2017	3985221	79704.42
2018	5089667	101793.34
2019	7145039	142900.78
2020	7486251	149725.02
2021	8099591	161991.82

Posibles usos y aplicaciones del bagazo de agave.

Debido a su alta disponibilidad, el bagazo de agave debe ser considerada como una fuente renovable de materia prima, ya que debido a sus características puede ser utilizado para la elaboración de diferentes compuestos como se muestra en la tabla 4.

Tabla 3 Principales usos del bagazo de agave. Fuente: (Gonzales, Gonzales, & Nungaray, 2005)

Industria	Usos
Papelera	Producción de papel, corchos, cartón
Construcción	Elaboración de ladrillos, adobes, aglomerados

Química	Obtención de enzimas, producción de etanol, biopolímeros, carbón activado
Alimentaria.	Producción de Xilitol colorante alimenticio. Obtención de vainillina.
Agricultura	Sustratos fertilizantes, composta
Ganadera	Alimento para ganado
Otras	Elaboración de fibras para la producción de cuerdas.

Bioetanol.

El bioetanol conocido también como alcohol etílico o etanol, es un biocombustible obtenido por vía fermentativa utilizando como materia primas diversas fuentes tales como la caña de azúcar, el trigo, maíz, materia vegetal, residuos agroindustriales y orgánicos , sorgo entre otros, este combustible ofrece una ventaja ambiental puesto que producen una menor contaminación en comparación de los combustibles fósiles, se ha demostrado que al ser mezclado con gasolina convencional es capaz de reducir las emisiones de monóxido de carbono y al ser utilizado al 100% en motores modificados no produce emisiones de dióxido de azufre_(De la Cerna , 2016).

Producción de Bioetanol

La producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica como materia prima implica principalmente las siguientes etapas (Ver Fig. 3.): Pretratamiento de la biomasa, Hidrolisis enzimática de la celulosa y hemicelulosa, fermentación de los azúcares obtenidos, destilación y purificación del bioetanol (Mosier, Wyman , Dale, Eleander, & Lee, 2005).

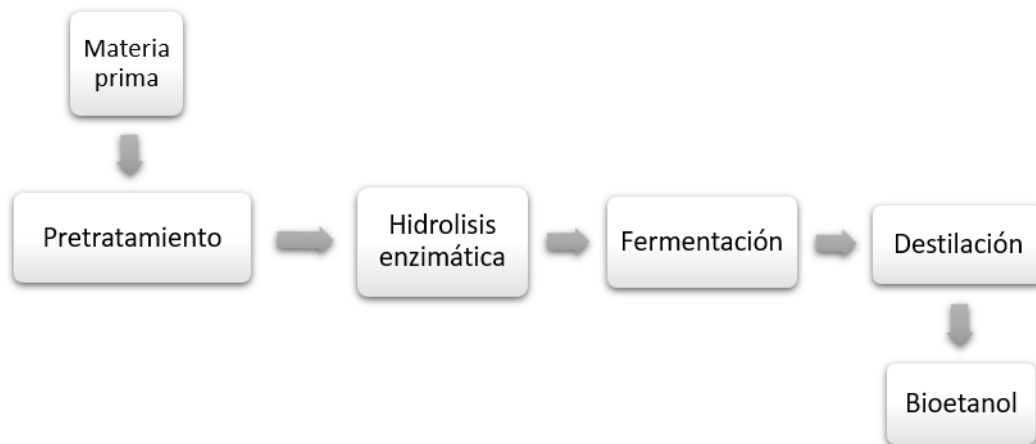


Fig. 5 Esquema del proceso básico de elaboración de Bioetanol, Fuente propia en base a fuentes consultadas.

Pretratamiento

Para poder hidrolizar eficientemente la lignocelulosa a monosacáridos que sean fermentables es requerido un pretratamiento previo, puesto que éste es capaz de alterar algunas características de la lignocelulosa teniendo como resultado mayor accesibilidad a glucanos y xilanos los cuales quedarán mayormente susceptibles al ataque enzimático aumentando así la digestibilidad de la celulosa.

De acuerdo con Alvira y col. (Alvira, Tomás , Ballesteros, & Negro, 2009) el pretratamiento elegido para nuestro proceso tendrá un impacto significativo en las etapas posteriores de obtención de bioetanol; tales como el porcentaje de digestibilidad de la celulosa, generación de compuestos inhibidores que afectarán a los microorganismos empleados en la fermentación, así como la cantidad de biomasa sacarificada.

Alvira y col. (Alvira, Tomás , Ballesteros, & Negro, 2009) también mencionan los pretratamientos más utilizados en este proceso, resumiendo su investigación los pretratamientos se dividen principalmente en tres tipos: Biológicos, físicos y químicos los cuales se describen a continuación.

Biológicos

Este pretratamiento se caracteriza por la utilización de microorganismos tales como hongos que son capaces de degradar la lignina y hemicelulosa presente en la materia prima (Alvira, Tomás , Ballesteros, & Negro, 2009).

Físicos

Trituración. Tiene como objetivo reducir el tamaño de la partícula del material lignocelulósico ayudando así a mejorar la hidrólisis enzimática, otro pretratamiento físico es la extrusión en el cual la materia es calentada, molida para finalmente ser extruida cambiando así sus propiedades iniciales.

Tratamiento hidrotérmico: Se encarga de inundar la lignina con agua a altas temperaturas provoca alteraciones de la lignocelulosa, Alvira y col. describen que este tratamiento puede remover la hemicelulosa mejorando así la digestibilidad enzimática (Alvira, Tomás , Ballesteros, & Negro, 2009).

Químicos

Pretratamientos alcalinos. Se caracterizan por la inundación de la materia prima en sustancias alcalinas tales como hidróxidos de sodio, potasio, entre otros, estos provocan el rompimiento de la estructura original de la lignina.

Pretratamientos ácidos. Su propósito es solubilizar la hemicelulosa y hacer a la celulosa más susceptible a las enzimas utilizadas en la etapa siguiente, los ácidos más utilizados son el ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H₂SO₄), una desventaja de este pretratamiento son los costos de mantenimiento debido a la corrosión de los equipos utilizados, así como los problemas de recuperación de ácidos (Alvira, Tomás , Ballesteros, & Negro, 2009).

Ozonólisis: El ozono ha demostrado remover la lignina al ser oxidante, aumentando así el rendimiento de la materia prima en la hidrólisis enzimática, tiene como ventaja la no producción de compuestos inhibidores su desventaja es económica debido a las grandes cantidades necesarias para este tratamiento (Alvira, Tomás , Ballesteros, & Negro, 2009).

Hidrolisis

La hidrólisis de la celulosa es un proceso en el cual la celulosa, que es un tipo de polímero estructural de la D-glucosa que se unen entre sí por enlaces β -1,4, esta

molécula se encuentra en las paredes celulares de las plantas, se descompone en sus unidades de glucosa constituyentes mediante la adición de agua y la acción de enzimas o ácidos. (Guarnizo Franco, Martínez Yépes, & Valanecia Sánchez, 2009)

La hidrólisis de la celulosa puede ser catalizada por enzimas celulíticas o por tratamientos ácidos, dependiendo de la aplicación específica y las condiciones deseadas. Es un proceso que implica la ruptura de los enlaces glucosídicos en la estructura de la celulosa, liberando glucosa y otros productos derivados.

Hidrolisis enzimática

Cuando el pretratamiento se haya llevado a cabo dispondremos de una biomasa con características mejoradas para realizar una sacarificación la cual es una etapa muy importante para la producción de bioetanol. Este proceso se lleva a cabo mediante una hidrolisis enzimática, la cual busca degradar mediante enzimas llamadas hidrolasas a la celulosa y hemicelulosa a monosacáridos tales como glucosa, maltosa, maltotriosa, maltotetralosa, maltopentosa y maltohexosa que posteriormente serán utilizados en la fermentación (Méndez, Briones, Sandoval, & Perez, 2018).

En la hidrolisis enzimática las enzimas celulasa y hemicelulasa son las responsables de romper los enlaces de la celulosa y hemicelulosa contenidos en la biomasa lignocelulósica, la primera se hidroliza a glucosa mientras que la hemicelulosa da lugar a varias pentosas y hexosas (Sarkar, Kumar, & Banerjee, 2011).

Esta hidrolisis presenta ventajas ante la hidrolisis ácida puesto que es capaz de ahorrar energía debido a que el tipo de enzima utilizada en este caso la celulasa se puede operar a temperaturas que van desde los 40°C a 50°C y con un pH de 4 a 5, también presenta baja toxicidad y no se forman subproductos inhibitorios. (Sarkar, Kumar, & Banerjee, 2011).

Hidrolisis ácida

La hidrolisis ácida involucra el uso de un ácido para la degradación de la celulosa y hemicelulosa, el Ácido sulfúrico ha sido reportado como el más usado en este proceso debido a las ventajas que presenta en su bajo costo y cortos tiempos de reacción. Chandler y col. (Chandler, Villalobos, & Gonzales, 2012) mencionan que, para la producción de etanol, el uso de la hidrolisis ácida es mucho menos efectiva que la

enzimática debido a la formación de compuestos inhibidores que afectan la fermentación, así como también se describe los problemas de corrosión en los equipos utilizados y los residuos generados son de difícil recuperación. (Ver Tabla 4)

Tabla 4 Ventajas y desventajas de la hidrólisis enzimática y ácida. Fuente (Tejada, Quintana , & Pérez, 2011)

	Ventajas	Desventajas
Hidrolisis acida	Rendimientos de reacción más altos	Puede afectar el proceso de fermentación debido a la afectación de los microorganismos por los productos generados en la degradación.
	No requiere pretratamientos complejos	Es necesario neutralizar el fermentado antes de la fermentación
Hidrolisis enzimática	Este proceso es más sostenible ambientalmente que el uso de ácidos	Las barreras de lignina presentan una barrera física que impide el ataque enzimático
	No requiere una neutralización del hidrolizado para la fermentación	Requiere un pretratamiento para que la celulosa se encuentre más disponible para la acción enzimática.

5.4.3 Fermentación

Una vez obtenida la biomasa sacarificada con hidrólisis enzimática se procede a la fermentación. La fermentación es un proceso catabólico que permite la degradación de los azúcares en alcohol y dióxido de carbono (CO₂). De acuerdo con Hernández M. (Hernández, 2007) en la fermentación las levaduras son capaces de convertir hexosas tales como la glucosa, manosa y fructosa en Etanol, H₂O y ATP mediante la siguiente ecuación.



También menciona que del proceso fermentativo se obtienen subproductos como lo son aldehídos, ésteres, ácidos orgánicos en los que destacan el ácido acético, butírico, láctico propiónico y tartárico (Hernández, 2007).

5.4.4 Microorganismos utilizados en la fermentación alcohólica

En el proceso de fermentación se busca emplear un microorganismo que sea ideal, es decir que sea capaz de digerir correctamente el sustrato teniendo así un alto rendimiento en la producción de etanol, igualmente debe ser tolerantes a los inhibidores generados en la hidrolisis y que produzca toxinas en menor medida. Entre los microorganismos más usados actualmente destacan: *Saccharomyces cerevisiae*, *S. ellipsoideus*, *S. anamensis*, *Candida seudotropicalis*, *S. carlsbergensis*, *Kluyveromyces marxianus*, *Candida bytyrii*, *Pichia stipatis*, *Schizosaccharomyces pombe* y *Pichia membranaefaciens* (Hernández, 2007).

CAPITULO II METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se planteó una metodología experimental dividida en dos fases con el objetivo de obtener el resultado más favorable en la obtención de bioetanol a partir de bagazo húmedo y bagazo seco. Cada fase incorpora diferentes parámetros y condiciones específicas para lograr la hidrólisis enzimática y la fermentación efectiva del bagazo de agave

Fase 1: Obtención de Bioetanol a partir de Bagazo Húmedo

En esta fase inicial, el enfoque se centró en el bagazo húmedo como sustrato principal. Se siguieron los siguientes pasos:

- Preparación del Bagazo Húmedo: El bagazo húmedo se recolectó y acondicionó para su procesamiento posterior.
- Hidrólisis Enzimática: Se añadió 1 ml de enzima específica al bagazo húmedo para descomponer los componentes celulósicos y liberar los azúcares presentes.
- Tiempo de Hidrólisis: Se estableció un tiempo determinado para la hidrólisis, durante el cual las enzimas actuaron sobre el bagazo húmedo para liberar los azúcares simples.
- Fermentación: Los azúcares liberados durante la hidrólisis se sometieron a un proceso de fermentación, en el cual microorganismos convertían los azúcares en bioetanol.

Fase 2: Mejora de la Obtención de Bioetanol a partir de Bagazo Seco

La fase 2 buscó mejorar el proceso y los rendimientos utilizando bagazo seco y ajustando otros parámetros:

Uso de Bagazo Seco: En esta etapa, se empleó bagazo seco en lugar de bagazo húmedo, lo que podría influir en la eficiencia del proceso,

Variación de la dosis de enzima utilizada: Se utilizaron dosis diferentes de la misma enzima para la hidrólisis enzimática, lo que permitió explorar cómo la dosificación afecta la liberación de azúcares.

Tiempo de Fermentación: El tiempo de fermentación se incrementó en comparación con la fase 1, con el propósito de lograr una conversión más completa de azúcares en bioetanol.

Fase 1.

Obtención de la materia Prima.



Fig. 6 Bagazo residual en un palenque, Matatlán Tlacolula Oaxaca. Fuente propia.

La obtención de la materia prima se realizó el palenque llamado "Gran Calenda" ubicado en el municipio de Santiago Matatlán, Tlacolula, Oaxaca (Ver figura 6). Se colocó aproximadamente 20 kg de Bagazo húmedo en un contenedor plástico para facilitar su traslado a la ciudad de Puebla.

Caracterización de la materia prima.

Para la obtención de las propiedades fisicoquímicas del bagazo de agave necesarias para desarrollar la metodología se compararon dos estudios publicados por la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas y la Revista Internacional de Contaminación Ambiental de la UNAM en donde se describen las propiedades del bagazo de *agave angustifolia* utilizado en el estado de Oaxaca puesto que se ha planteado su uso principalmente como composta para su utilización como sustrato en diversos cultivos.

Tabla 5 Propiedades Fisicoquímicas del bagazo de Agave

Propiedades	Bagazo de <i>Agave angustifolia</i> . (RMCA)	Bagazo de <i>Agave angustifolia</i> (RICA)
Humedad (%)	80.03 ±4.06	80.60
Fibra	29.97 ±6.54	-
Materia seca (%)		19.40

Materia Orgánica (%) ^b	90.21	89.76
Nitrógeno Total (NTK%) ^b	0.26	0.38
pH	5.42 ± 1.48	5.32
Cenizas % ^b	-	10.24
Celulosa % ^b	-	41.09
Hemicelulosa % ^b	-	28.32
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	1.32 ± 0.09	1.37

B en base seca, RMCA Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas RICA Revista Internacional de Contaminación Ambiental.

Las metodologías utilizadas por los autores de las publicaciones en las revistas se describen a continuación.

El Nitrógeno Total fue obtenido por el método de Kjeldahl a una temperatura de 105° C; para las cenizas se utilizó el método descrito por la AOAC (Association of Official Agricultural Chemists) en una mufla a 550° C; el pH se obtuvo con un potenciómetro de marca Hanna pH 211 y la conductividad eléctrica con un medidor modelo Extech ambos en una disolución bagazo: agua. El % de humedad y materia seca se determinaron por el método gravimétrico descrito en la AOAC.

Las determinaciones de Celulosa y Hemicelulosa fueron realizadas mediante los análisis de fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA)

Pretratamiento de Materia prima.

Para la primera fase el tratamiento de la materia solo se consideró un pretratamiento térmico, ya que el bagazo ya es sometido a altas temperaturas en el proceso de obtención de mezcal, exactamente en la etapa de cocción y destilación. Como se puede ver en la figura 7.



Fig. 7 Cocción de las piñas de agave. Fuente: https://www.eleconomista.com.mx/_export/1507909986898/sites/eleconomista/img/historico/prin_san_pablo_villa_oaxaca.jpg_673822677.jpg

Hidrolisis enzimática.

Debido a las ventajas que presenta la hidrolisis enzimática en comparación con la hidrolisis ácida, será elegida para la sacarificación de la celulosa en esta investigación.

Esta etapa se llevó a cabo empleando la enzima "celulasa ácida" que es un complejo enzimático comercial utilizado por la industria textil pero además ha sido utilizado para la predigestión de materia vegetal (Ver figura 8).

Se deberán implementar los parámetros óptimos en los que trabaja la enzima para obtener el mejor rendimiento en la degradación de la celulosa. Estos parámetros son dados por la empresa fabricante de la enzima (pH 4, temperatura 30-40°C).



Fig. 8 Enzima Celulasa Ácida

Procedimiento:

En la balanza analítica se pesaron 50g, 75g y 100 g de bagazo húmedo posteriormente fueron colocados en tres recipientes de vidrio respectivamente, se agregaron 500 ml de agua destilada, Ver figura 9.

Obtenida las disoluciones de bagazo-agua se midió el pH para que estuviera de acuerdo con los parámetros requeridos (pH 4); seguidamente se agregó 1 ml de la enzima Celulasa Ácida en cada disolución y se colocaron en una parrilla para calentar a 40° C. así como mantenerla en agitación constante durante 5 horas que consideramos duraría la hidrolisis enzimática, Ver figura 10.

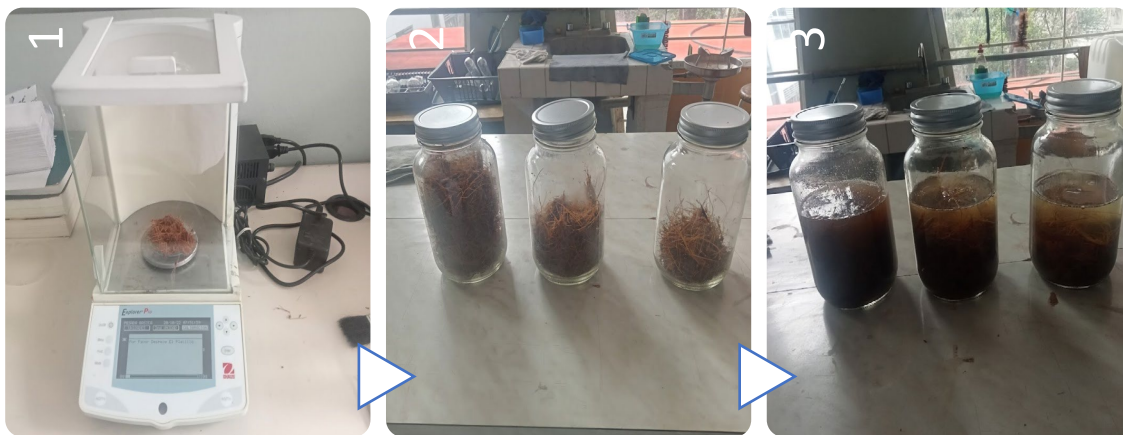


Fig. 9 Procedimiento de la Hidrolisis

1. Pesado del bagazo, 2. Recipientes con el Bagazo pesado 3. Agregado de 500 ml de agua destilada



Fig. 10 Medición de pH y parámetros adecuados para la hidrolisis enzimática

Métodos de prueba para determinación de azúcares presentes.

Para determinar si hubo sacarificación en la hidrólisis enzimática se realizó la medición de grados brix para obtener la cantidad de azúcares presentes después de la hidrólisis, así como también el método de prueba de Azul de metileno, las cuales se caracterizan por ser ensayos indicadores de azúcares reductores.

Grados brix

Se tomó una pequeña muestra de cada disolución y se llevó al laboratorio de análisis instrumental para poder realizar la medición con ayuda del Refractómetro, puesto que este instrumento nos proporciona un índice de refracción que es proporcional a la concentración de azúcares disueltos. Una vez obtenida la medición se guardaron los resultados para su posterior análisis. Ver Figura 11.



Fig. 11 Refractómetro utilizado en la medición de grados Brix

Prueba Azul de Metileno

Otra forma conocer si hay presencia de azúcares fermentables en las muestras es desarrollando el método de prueba prueba azul de metileno.

Esta prueba se caracteriza por ser un método indicador por el cambio de color en la solución que se genera, este método consiste en mezclar unas gotas de azul de metileno con hidróxido de sodio y glucosa u otro azúcar reductor, la mezcla que se forma será de color azul, con el tiempo tiende a decolorarse; pero si se somete a

agitación vuelve a tornarse azul, esta variación de color puede repetirse varias veces más.

De acuerdo con Stacy y col. (Stacy M. Wittkopp, Christopher J. Painter, Jessica J. Liegel, Rodney Schreiner, Jerry A. Bell, and Bassam Z. 2012) esta reacción es causada por la oxidación de la glucosa por el azul de metileno, este colorante a su vez es reducido a azul de leucometileno que su característica principal es que es incoloro, por lo que la disolución tiende a decolorarse.



Una vez aplicada la agitación esta disolución disuelve el oxígeno atmosférico en el agua lo que ocasiona que el azul de leucometileno se reoxida a azul de metileno tornando la mezcla nuevamente a color azul

Después la glucosa volverá a reducir al azul de metileno formado. La función del hidróxido sódico es convertir la glucosa en ciertos productos que también intervienen en el proceso

Es por ello que esta prueba resulta eficiente en la detección de azúcares reductores en una disolución, puesto que si se realiza una prueba y esta reacciona como se describe anteriormente se comprueba que existe glucosa u otros azúcares reductores en una disolución.

Procedimiento

En un matraz se colocó 90 ml de agua destilada seguido de 10 ml de nuestra muestra, pesamos y añadimos 2 gramos de hidróxido de sodio y por último añadimos 2 ml de azul de metileno. Ver figura 12.

La prueba es positiva si la disolución se torna de color azul que desaparece en un par de minutos aproximadamente. Si agitamos el matraz el color azul vuelve a aparecer.

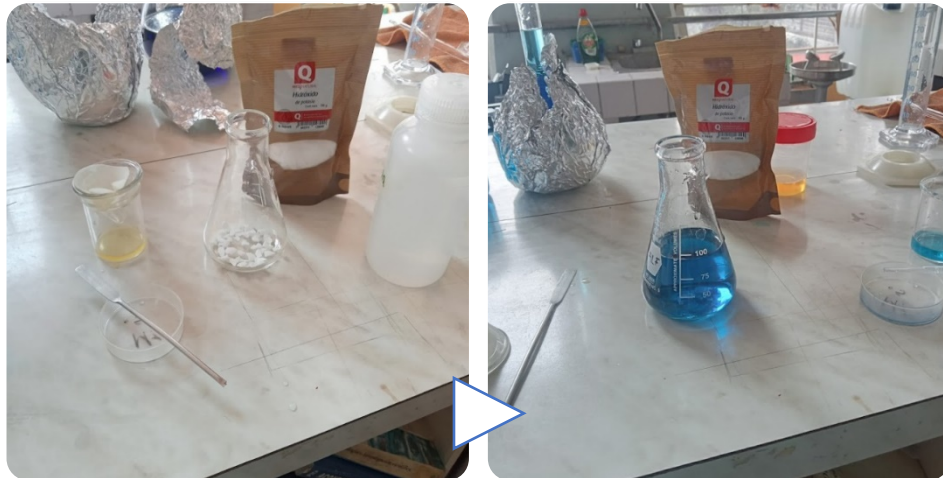


Fig. 12 Procedimiento del método de prueba de azul de metileno

Fermentación

Una vez realizada la hidrólisis enzimática y obteniendo resultados positivos en los métodos de prueba, se llevó a cabo el proceso de fermentación mediante el empleo de la levadura comercial *Saccharomyces cerevisiae* (Ver figura 13) en un medio anaerobio, con diferentes razones de sustrato y parámetros adecuados tales como un rango de temperatura que va desde los 30 a 40 ° C y tiempo de fermentación estimado de 4 a 15 días.



Fig. 13 Levadura comercial *Saccharomyces cerevisiae*

Procedimiento

1. Para iniciar este proceso primero fue necesario realizar una filtración para separar el bagazo residual del hidrolizado obtenido en la etapa anterior, se sometió a un filtrado físico con una malla de tamaño de abertura de 2mm y posteriormente a un filtrado con papel filtro.
2. Se precalentaron los recipientes con el contenido de hidrolizado a una temperatura de 40 °C pues es a esta que la levadura se activa.
3. Se pesaron 5 gramos de levadura comercial de cerveza *Saccharomyces cerevisiae* seguidamente se agregaron en cada recipiente.
4. Los recipientes se les colocó una trampa de agua para permitir que salieran los gases generados durante la fermentación, pero impide que entre en contacto con el oxígeno atmosférico, puesto que es un proceso anaerobio
5. Los recipientes se colocaron en un horno a 40° C de temperatura durante 7 días. (Ver figura 14).



Fig. 14 Etapa de fermentación

Destilación.

Terminado el proceso de fermentación y considerando que hubo generación de bioetanol en dicha etapa se busca separarlo mediante una destilación simple.

Se tomo una muestra de 250 ml de cada una de las disoluciones fermentadas y posteriormente se llevó a destilación simple (Ver figura 15), el tiempo de la destilación fue aproximadamente de 1 hora con 15 minutos. Terminado el proceso de destilación

se obtuvieron 3 muestras que posteriormente fueron analizadas mediante un espectrofotómetro Uv-vis.



Fig. 15 Equipo de destilación utilizado.

Fase 2

Una vez obtenido los resultados de la Fase 1 se decidió experimentar en la dosis específica de la enzima, dejando constante el peso de la materia prima que fue de 20 gramos, y solo hubo variación en la concentración de enzima utilizada, así mismo de acuerdo con los resultados se planteó un tiempo de fermentación en 7 y 15 días para observar la variación en los resultados.

Pretratamiento de la materia prima

Debido a la cantidad de humedad presente en el bagazo se decidió dar un tratamiento de secado, el cual consistió en colocar la materia prima en un recipiente de vidrio que luego sería colocado en un horno a 45°C durante 5 horas para obtener un bagazo seco (ver figura 16)



Fig. 16 Secado de la materia prima

Seguidamente se implementó un tratamiento físico de trituración, esto para facilitar la maniobrabilidad, así como aumentar el área de contacto durante el ataque enzimático en la hidrólisis. (Ver figura 17).



Fig. 17 Triturado del bagazo de agave seco

Hidrolisis enzimática

Se repitió el procedimiento realizado en la hidrólisis de la Fase 1 utilizando el mismo complejo enzimático, en esta fase se hizo una variación de la concentración empleada, en la Fase 1 fue de 1 ml y en este serán tres muestras de 5ml, 10ml y 15 ml

de enzima respectivamente, esto con el fin de obtener una mayor cantidad de azúcares fermentables durante la sacarificación

Procedimiento:

Se colocó 20 gramos de bagazo seco y previamente triturado en cada recipiente, para luego agregar 500 ml de agua destilada a cada uno, se midió el pH y posteriormente utilizando una pipeta graduada se agregaron 5ml, 10ml y 15 ml de enzima "Celulasa ácida" en cada recipiente respectivamente, los frascos utilizados fueron etiquetados para llevar el control durante la experimentación. Ver figura 18.

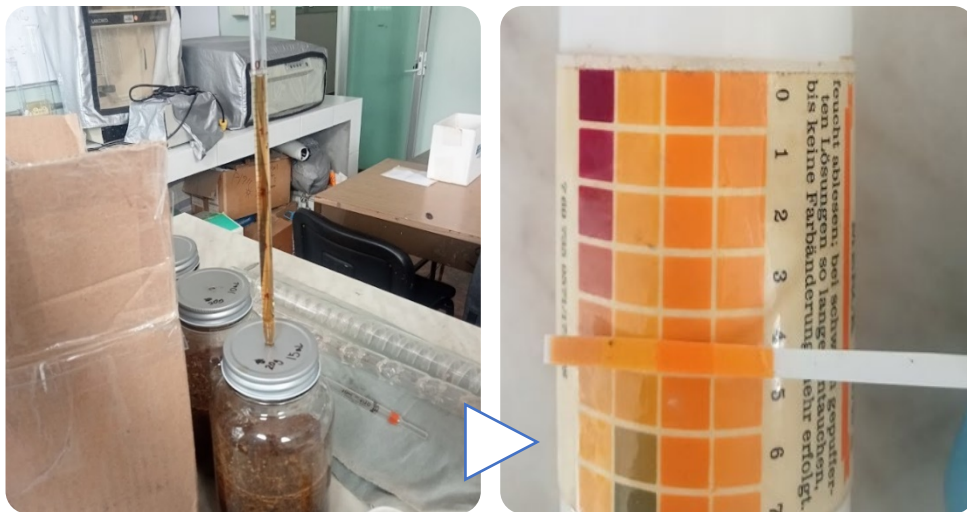


Fig. 18 Dosificación de la enzima y medición de pH

Una vez agregada la enzima se colocaron los frascos con las muestras en un horno para llevar un control de la temperatura óptima para la hidrólisis que es de 40°C, así mismo llevo una agitación, el tiempo fue de 10 horas. Ver figura 19.



Fig. 19 Hidrolisis enzimática de la fase 2

Metodos de Prueba

Al igual que en la Fase 1 se realizaron los mismos metodos de prueba para corroborar la presencia de azucres en el hidrolizado, nuevamente se hizo la prueba de azul de metileno y la medición de grados brix mediante el refractometro. Ver figura 20 y 21.



Fig. 20 Medición de Grados brix en el hidrolizado de la Fase 2



Fig. 21 Prueba de Azul de Metileno para Fase 2

Fermentación.

Obteniendo resultados positivos en los métodos de prueba y en la medición de grados brix, se procede a realizar el proceso de fermentación utilizando nuevamente la levadura comercial de cerveza *sacharomices cerevisiae*, a diferencia de la Fase 1, en este el tiempo de fermentación se aumentó a 7 días, y otro en 15 días, por lo que se obtienen 6 muestras, las 3 primeras con un hidrolizado con 5, 10 y 15 ml de enzima respectivamente y un tiempo de fermentación de 7 días y otras 3 muestras igualmente dosificadas con 5 10 y 15 ml pero con 15 días de fermentación. Ver figura 22.



Fig. 22 Proceso de Fermentación a 40 °C durante 7 y 15 días

Destilación

Una vez pasado el tiempo de fermentación se realizaron dos destilaciones; la primera con el fermentado obtenido a los 7 días y la segunda con el fermentado obtenido a los 14 días, se aplicó el mismo procedimiento que en la Fase 1, utilizando la destilación simple y utilizando 250 ml de cada muestra. Ver figura 23.



Fig. 23 Destilación en la Fase 2.

Pruebas realizadas

Para poder conocer si obtuvimos bioetanol en nuestras muestras (Ver figura 24) se realizaron dos pruebas para conocer su composición.



Fig. 24 Muestras obtenidas en ambas fases

UV- Vis

Realizamos un barrido de cada una de las muestras en el espectrofotómetro UV-vis, colocamos 1 ml aproximadamente de la muestra en la celda del espectrofotómetro y

realizamos el barrido ayudándonos del software integrado del espectrofotómetro en donde obtuvimos los espectros de cada muestra que posteriormente fueron analizados. Ver figura 25.

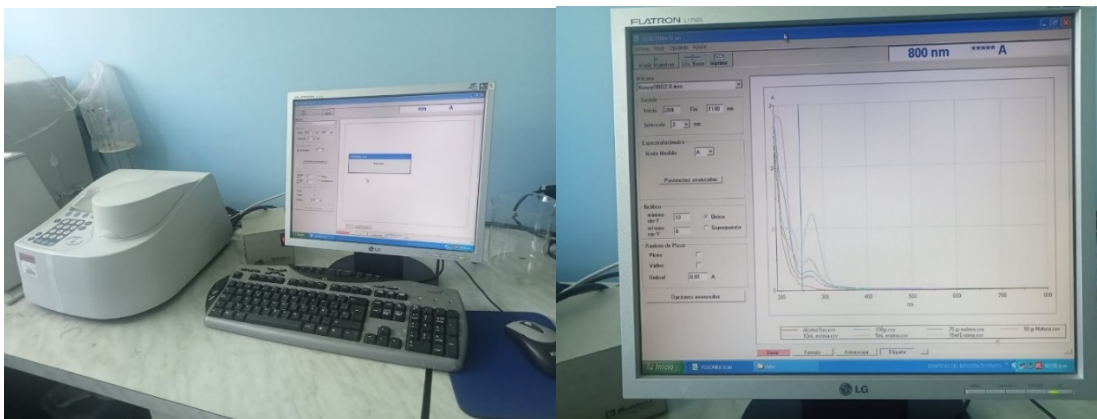


Fig. 25 Espectrofotómetro UV- vis utilizado para el análisis de las muestras.

Obtención de la Densidad

A partir de la densidad es posible calcular la concentración de alcohol en una solución, utilizando una curva de calibración construida a partir de estándares con concentraciones conocidas de alcohol

Es importante mencionar que la relación entre la densidad y la concentración de alcohol puede variar según la temperatura y la composición de la mezcla es por ello que la medición de la densidad se debe realizar a una temperatura constante la cual debe coincidir con la temperatura que se utilizó para la creación de la curva de calibración.

La estimación de la densidad de las muestras obtenidas la realizamos con ayuda de un picnómetro de 5 ml de volumen.

Se introdujeron 5 ml de cada muestra obtenida en el picnómetro para después pesarlo en la balanza analítica, se anotaron los resultados para su posterior análisis, se repitió la prueba dos veces para conocer si había variaciones. Las mediciones se llevaron a cabo a una temperatura constante de 20° C. Ver figura 26.



Fig. 26 Medición de la densidad en las muestras obtenidas

CAPITULO III. DISCUSIÓN Y RESULTADO

Resumiendo, la metodología experimental consto de dos fases, la primera de ellos se desarrolló con el uso de bagazo húmedo con una cantidad fija de enzima, un tiempo de hidrolisis de 6 horas y una fermentación que duro 7 días. En la fase 2 se ajustaron parámetros incluyendo el uso de bagazo seco, diferentes dosificaciones de enzima y un tiempo de fermentación de 7 y 14 días.

Muestras obtenidas.

Derivado de las dos fases realizadas se obtuvieron 9 muestras en total, en la primera fase se produjeron 3 muestras y en la Fase 2 se produjeron 6 más, las cuales se describen a continuación.

Tabla 6 Muestras

obtenidas y parámetros utilizados en la metodología.

Fase	Muestra	Cantidad de Bagazo utilizado (gramos)	Cantidad de enzima utilizada (ml)	Tiempo de Fermentación (días)
1	A	100	1	7
	B	75	1	7
	C	50	1	7
2	D	20	5	7
	E	20	10	7
	F	20	15	7
	G	20	5	14
	H	20	10	14
	I	20	15	14

Para verificar la presencia de azúcares fermentables después de la hidrólisis enzimática, se midieron los grados Brix antes y después del proceso. Además, se realizó una prueba utilizando azul de metileno como indicador de la presencia de azúcares reductores. Los resultados de estas pruebas se presentan a continuación. Es importante destacar que la hidrólisis se llevó a cabo durante un periodo de 6 horas. Ver tabla 7.

Tabla 7 Grados Brix de las muestras antes y después de la Hidrólisis y Prueba de Azul de metileno.

Muestra	pH	Prueba con Azul de Metileno	Temperatura °C	°Brix Inicial	°Brix Final
A	4	Positivo	23	0	1.1
B	4	Positivo	23	0	1.3
C	4	Positivo	23	0	1.4
D	4	Positivo	23	0	1.2
E	4	Positivo	23	0	2
F	4	Positivo	23	0	1.8
G	4	Positivo	23	0	1.4
H	4	Positivo	23	0	1.5
I	4	Positivo	23	0	1.4

El control de la temperatura en la medición de grados brix se debe mantener constante para evitar variaciones en los datos arrojados por el refractómetro.

Resultados de Fermentación

La fermentación se realizó durante 7 días para las muestras de la A la F, y de 14 días para las muestras G, H e I, la temperatura constante de 45°C y sin presencia de oxígeno. Ver tabla 8.

Tabla 8 Cantidad obtenida de cada muestra en ml después de la destilación.

MUESTRA	Temperatura de Fermentación (°C)	Cantidad Obtenida (ml)
A	85-89	11.12
B	85-89	12
C	85-89	12.8467
D	85-89	10.8
E	85-89	13.82874
F	85-89	12.1934
G	85-89	12.245
H	85-89	12.34
I	85-89	11.6549

Determinación del % de etanol con curva de calibración de Uv-vis.

La presencia de etanol en las muestras se determinó con el resultado de la medición del barrido del espectrofotómetro UV-Vis

Los resultados arrojados por el espectrofotómetro UV-Vis fueron Graficados en el Software Origin Pro 2023 para su mejor análisis. Ver figuras 27, 28 y 29.

Los espectros pueden denotar que el pico más alto corresponde al etanol, se encuentra cercano a los 200 nm, así mismo se ve una interferencia cerca de los 300 nm, que probablemente corresponda a otro compuesto orgánico, esta se intensifica en las figuras 28 y 29.

Para obtener mejores interpretaciones de las muestras se planeaba utilizar el espectrofotómetro Infrarrojo, así como el espectrómetro de masas, estos servirían para conocer los grupos funcionales que estaban presentes, así como para ampliar el espectro requerido, pero debido a temas de falta de equipo por falta de mantenimiento durante la pandemia por COVID -19 no logramos obtener acceso a estos equipos en la facultad.

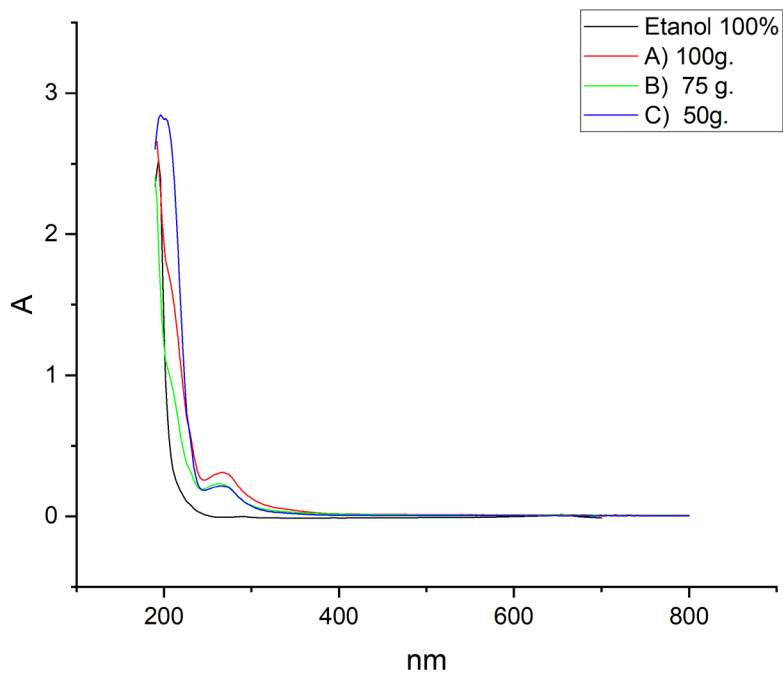


Fig. 27 Grafica de Barrido UV-vis Muestra A, B y C y una muestra de Etanol al 100 %

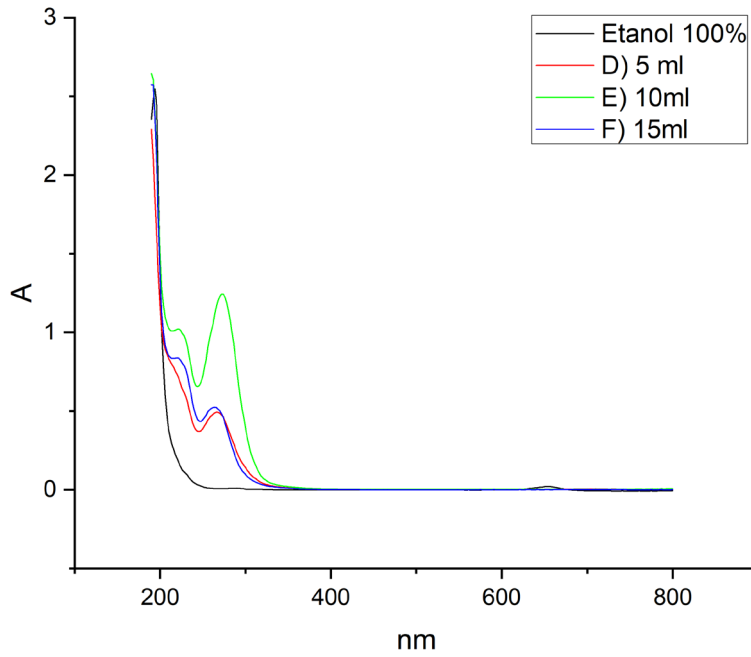


Fig. 28 Gráfico de Barrido UV-vis muestras D, E y F y muestra de etanol al 100%

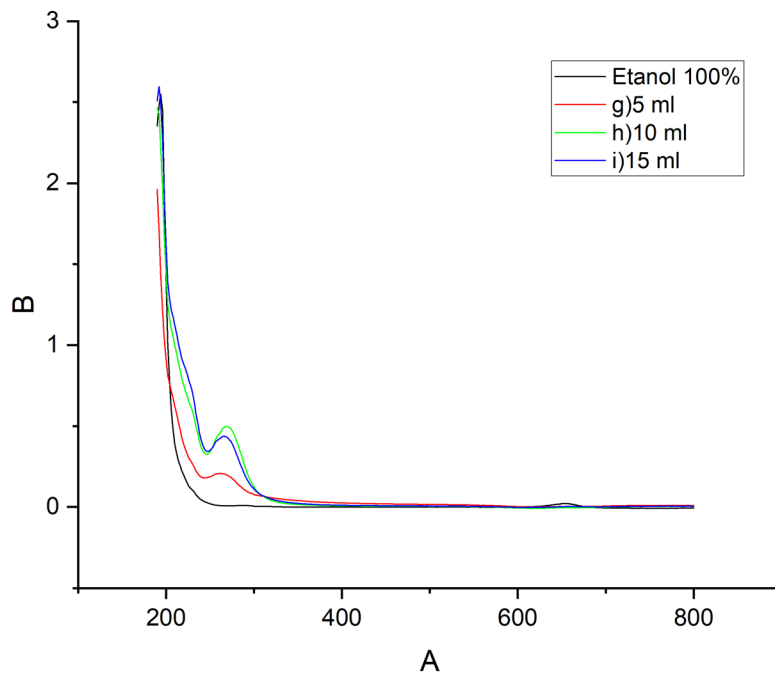


Fig. 29 Grafico de Barrido de UV. Vis muestras G, H e I y muestra de etanol al 100%

Determinación del % de etanol con curva de calibración de la densidad.

Se implementó una curva de calibración realizada con las densidades de las muestras y el % de etanol presente en unas muestras a una temperatura constante y diferentes porcentajes de concentraciones.

La curva de calibración se realizó utilizando las tablas descritas por Solis Santeliz (Solis Santeliz , 1983) en su tesis Construcción de una torre de destilación de platos perforados.

Se realizó la siguiente tabulación con los datos presentados para posteriormente realizar la curva de calibración en el software Origin Pro 2023, en donde se obtuvo la ecuación de la recta correspondiente a las concentraciones. Ver figura 30.

Tabla 9 Concentración y densidad del etanol a 20°C.

Concentración	Densidad
0	0.99823
2	0.99453
4	0.99103
6	0.9878
8	0.98478
10	0.98187
12	0.9791
14	0.97643
16	0.97387
18	0.97129
20	0.96864

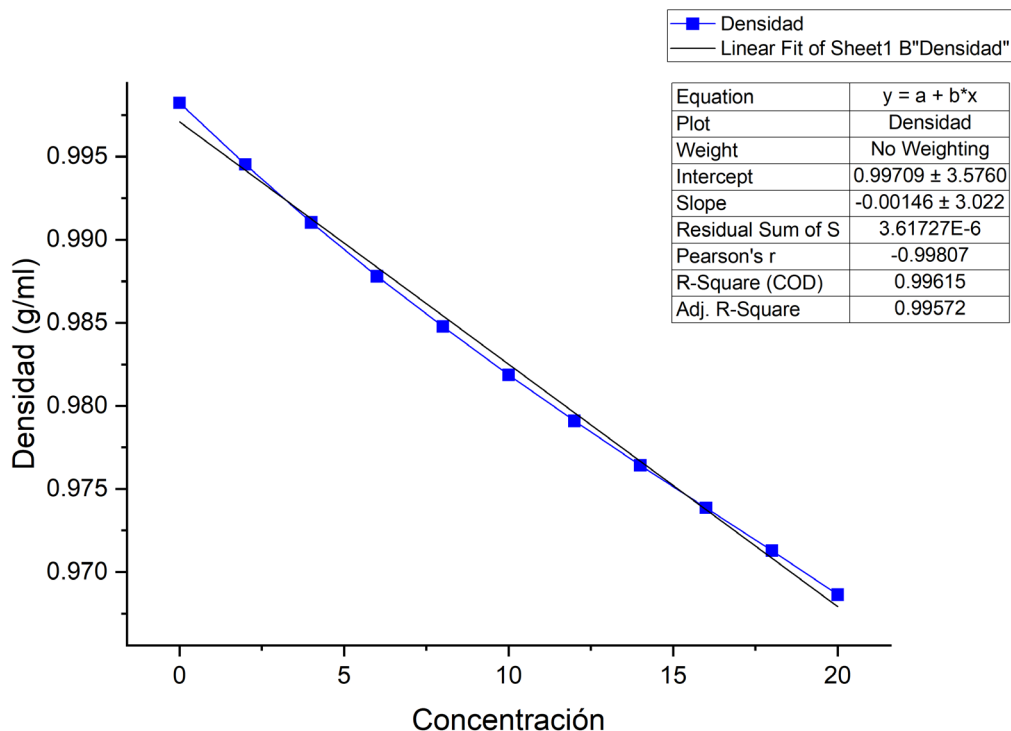


Fig. 30 Curva de Calibración de Densidad - Concentración en % de Etanol a 20°C

De acuerdo con el grafico generado se obtuvo la siguiente ecuación de la recta, la cual nos servirá para realizar la curva de calibración para obtener la concentración de cada muestra.

$$\text{Ec.1 } y = -0.00146x + 0.99709$$

Donde

y = Densidad

x= Concentración

Despejando obtenemos

$$\text{Ec.2 } x = \frac{-y+0.99709}{0.00146}$$

Una vez obtenida la ecuación para calcular la concentración a diferentes densidades ocupamos los resultados obtenidos en la medición de la densidad en las muestras, los cuales se muestran a continuación (Ver tabla 10).

Tabla 10 Resultados de la medición de la densidad en cada muestra.

Muestra	Temperatura	Peso del Picnómetro (g)	Peso Muestra + Picnómetro (g)	Peso de la muestra (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)
A (100 gr)	20 °C	18.9076	23.8578	4.9502	5	0.99004
B (75 gr)	20 °C	18.9076	23.8448	4.9372	5	0.98744
C (50 gr)	20 °C	18.9076	23.8698	4.9622	5	0.99244
D (Destilación con 5 ml de enzima)	20 °C	18.9076	23.851	4.9434	5	0.98868
E (Destilación con 10 ml de enzima)	20 °C	18.9076	23.862	4.9544	5	0.99088
F (Destilación con 15 ml de enzima)	20 °C	18.9076	23.8387	4.9311	5	0.98622
G (2da Destilación con 5 ml)	20 °C	18.9076	23.8885	4.9809	5	0.99618
H (2da Destilación con 10 ml)	20 °C	18.9076	23.8259	4.9183	5	0.98366
I (2da Destilación con 15 ml)	20 °C	18.9076	23.8407	4.9331	5	0.98662

En esta tabla se muestran las densidades obtenidas de cada muestra, con los datos de densidad nos fue posible calcular la concentración de etanol en cada una, para ello sustituimos los valores de densidad en la ecuación 2 y así obtuvimos la siguiente tabla

Ejemplificando los cálculos con la muestra A:

$$x = \frac{-y + 0.99709}{0.00146}$$

Donde

y = Densidad = 0.99004

x= Concentración

$$x = \frac{-(0.99004) + 0.99709}{0.00146}$$

$$x = 4.8287 \text{ Concentracion de Alcohol en \%}$$

Realizamos los mismos cálculos para cada muestra utilizando el software Excel y obtuvimos los siguientes resultados.

Tabla 11 Concentración en % de alcohol a 20°C en cada muestra obtenida.

Muestra	Densidad (g/mL)	Concentración de alcohol %
A (100 gr)	0.99004	4.82876712
B (75 gr)	0.98744	6.60958904
C (50 gr)	0.99244	3.18493151
D (Destilación con 5 ml de enzima)	0.98868	5.76027397
E (Destilación con 10 ml de enzima)	0.99088	4.25342466
F (Destilación con 15 ml de enzima)	0.98622	7.44520548
G (2da Destilación con 5 ml)	0.99618	0.62328767
H (2da Destilación con 10 ml)	0.98366	9.19863014
I (2da Destilación con 15 ml)	0.98662	7.17123288

Del mismo modo se obtuvo el siguiente gráfico.

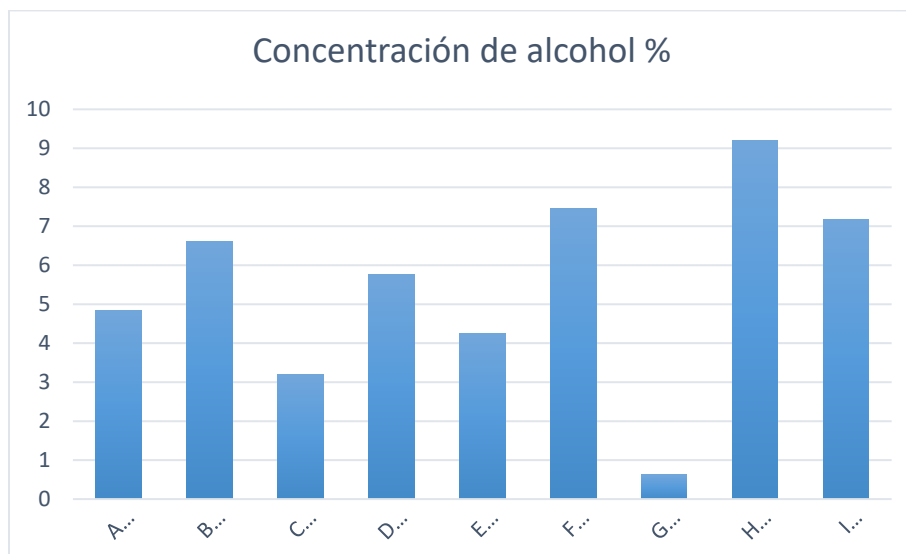


Fig. 31 Grafico de concentración de etanol en cada muestra a 20° C

Analizando los datos obtenidos descubrimos que la muestra H, es la que obtuvo mayor presencia de etanol.

Rendimiento de materia prima

Para obtener el rendimiento de la materia prima es necesario conocer el volumen que ocupa el etanol en la disolución, puesto que la concentración está dada en % en peso, para ello ejemplificamos los cálculos necesarios utilizando los datos de la muestra H, posteriormente utilizaremos el software Excel para obtener los demás resultados.

Primero debemos convertir la concentración de etanol en peso a una cantidad de masa en gramos. Luego, podemos utilizar la densidad de la disolución para convertir los mililitros de la solución en gramos y, a partir de ahí, calcular la masa de etanol en la disolución. Por último, podemos utilizar la densidad de la disolución nuevamente para convertir la masa de etanol en mililitros.

Datos muestra H

Densidad = 0.98366

Volumen = 5 ml

% de Etanol en peso=9.19863014

Masa total=4.9183

Tenemos que

$$\% \text{ de Concentración} = \frac{\text{masa del soluto}}{\text{masa de la disolución}} \times 100$$

Despejando y sustituyendo tenemos:

$$\text{masa etanol} = \frac{\% \text{ de concentración}}{100} \times \text{masa de la disolución.}$$

$$\text{masa etanol} = \frac{9.19863014}{100} \times 4.9183 \text{ g}$$

$$\text{masa etanol} = 0.452414 \text{ g}$$

Ahora que sabemos la masa de etanol en la disolución, podemos utilizar la densidad de la disolución para convertir los gramos de etanol a mililitros. Para ello, necesitamos dividir la masa de etanol por la densidad de la disolución:

Tenemos:

$$\text{Volumen etanol} = \frac{\text{masa etanol}}{\text{densidad de la disolución}}$$

Sustituyendo los valores que conocemos, tenemos:

$$\text{Volumen etanol} = \frac{0.452414 \text{ g}}{0.98366 \text{ g/ml}}$$

$$\text{Volumen etanol} = 0.459929 \text{ ml}$$

Por lo tanto, hay aproximadamente **0.459929** mililitros de etanol en la disolución de la muestra H

Realizando los cálculos para cada muestra nos queda la siguiente tabla.

Tabla 12 Volumen de etanol obtenido en cada muestra.

Muestra	Peso de la muestra (g)	Densidad (g/mL)	Concentración de alcohol %	Masa Etanol	Volumen de Etanol en ml
A (100 gr)	4.9502	0.99004	4.82876712	0.23903363	0.24143836
B (75 gr)	4.9372	0.98744	6.60958904	0.32632863	0.33047945
C (50 gr)	4.9622	0.99244	3.18493151	0.15804267	0.15924658
D (Destilación con 5 mL de enzima)	4.9434	0.98868	5.76027397	0.28475338	0.2880137
E (Destilación con 10 mL de enzima)	4.9544	0.99088	4.25342466	0.21073167	0.21267123
F (Destilación con 15 mL de enzima)	4.9311	0.98622	7.44520548	0.36713053	0.37226027
G (2da Destilación con 5 ml)	4.9809	0.99618	0.62328767	0.03104534	0.03116438
H (2da Destilación con 10 mL)	4.9183	0.98366	9.19863014	0.45241623	0.45993151
I (2da Destilación con 15 mL)	4.9331	0.98662	7.17123288	0.35376409	0.35856164

El volumen de cada disolución sigue siendo de 5 ml.

Rendimiento de la materia prima.

Con los datos obtenidos podemos cuantificar el rendimiento de nuestra materia prima en cada muestra.

Para calcular la cantidad de etanol que se obtendría a partir de 1 kg de materia prima, primero debemos conocer cuántos mililitros de etanol se producen por gramo de materia prima. Ejemplificando la muestra H ya que fue la de mayor rendimiento tenemos:

$$\frac{0.459929 \text{ ml de Etanol}}{20 \text{ g de Materia prima}} = \frac{X \text{ ml de Etanol}}{1000 \text{ g de Materia prima}}$$

Despejando la incógnita "x", tenemos:

$$X = \frac{0.459929 \text{ ml de Etanol}}{20 \text{ g de Materia prima}} \times (1000 \text{ g de Materia prima})$$

$$X = 22.99645 \text{ ml}$$

Por lo tanto, se obtendrían aproximadamente 22.99645 ml de etanol a partir de 1 kg de materia prima.

Para expresar el resultado en litros, podemos utilizar la conversión:

1 litro = 1000 ml

Entonces

$$\frac{1 \text{ litro}}{1000 \text{ ml}} \times 22.99645 \text{ ml} = 0.02299645 \text{ litros}$$

Es por ello que se obtendrían aproximadamente 0.02299645 litros de etanol a partir de 1 kg de materia prima.

Comparación del rendimiento de materia prima.

Para conocer que tan eficientes fueron nuestras pruebas, comparamos los resultados con los obtenidos en anteriores estudios, uno de ellos es de la UNAM en donde se obtuvo un rendimiento de 0.32 litros de etanol con 1 kg de bagazo

Se hizo el siguiente cálculo:

$$\frac{100\%}{0.32 \text{ litros}} = \frac{X\%}{0.02299645 \text{ litros}}$$

$$X = \frac{0.02299645 \text{ litros} \times (100\%)}{0.32 \text{ litros}}$$

$$X = 7.186390625 \%$$

Por lo tanto, nuestro rendimiento fue del 7.1863 % en comparación con los resultados publicados en la revista de investigación de la UNAM. Ver figura 32.

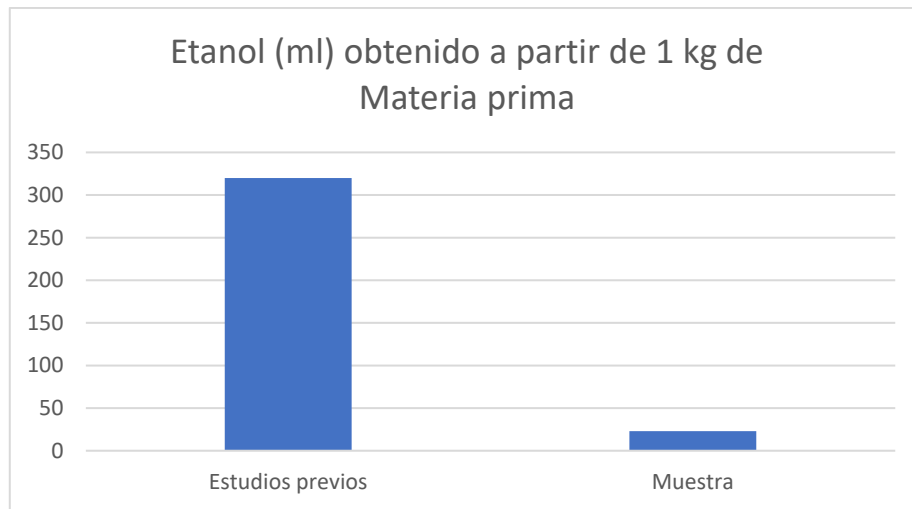


Fig. 32 Grafico del rendimiento de materia prima en estudios previos realizados vs muestra obtenida.

CAPITULO IV. CONCLUSIONES

En conclusión, el presente trabajo ha demostrado de manera efectiva la viabilidad de obtener bioetanol a partir del bagazo de *agave angustifolia* a través de una metodología experimental dividida en dos fases distintas. Durante la primera fase, se priorizó la utilización de bagazo húmedo y se establecieron condiciones controladas y el tiempo de hidrólisis.

La segunda fase de la investigación representó un cambio en el enfoque experimental. Se llevó a cabo modificaciones en varios parámetros del proceso. La sustitución del bagazo húmedo por bagazo seco permitió una comparación directa representativa de las condiciones de producción. La variación en la dosis de enzima y el tiempo de fermentación prolongado se tradujeron en un mayor aprovechamiento de los azúcares liberados durante la hidrólisis y una conversión más eficiente hacia el bioetanol.

En total se obtuvieron 9 muestras resultantes de ambas fases, siendo la muestra H la que mayor porcentaje de etanol presente siendo este 0.45993151 ml. Esta muestra se obtuvo de la Fase 2 utilizando bagazo seco, 10 ml de enzima y 14 días de fermentación, demostrando así que esta fase fue más eficiente que la fase 1. Por tanto, podemos concluir que los objetivos propuestos fueron cumplidos.

Los resultados obtenidos, mediante la evaluación cuantitativa de los rendimientos y la eficiencia, resaltaron la relevancia de los ajustes de parámetros para lograr resultados óptimos. Sin embargo, se siguen obteniendo rendimientos un poco bajos en comparación con otros estudios realizados.

Propuesta de valorización del residuo del bagazo de *Agave Angustifolia*.

No obstante, después del proceso de obtención de bioetanol se siguen obteniendo residuos orgánicos (ver figura 33) por lo que se le puede dar una propuesta de tratamiento final, ya sea como composta o para la fabricación de distintos productos de valor agrado tal es el caso de la fabricación de carbón activado, combustible vegetal, compostaje y obtención de biofertilizantes o incluso alimento para rumiantes, en tal sentido hemos investigado algunas posibles propuestas para la valorización de este residuo.



Fig. 33 Residuos Resultantes de la obtención de Bioetanol

Fabricación de Carbón Activado

El bagazo de agave es una opción interesante para la producción de carbón activado debido a su abundancia como subproducto de la industria del tequila y el mezcal. Además, el carbón activado derivado del bagazo de agave podría tener propiedades específicas debido a su origen vegetal y a las características intrínsecas de las fibras de agave.

El carbón activado producido a partir del bagazo de agave podría tener aplicaciones en la purificación de agua, la eliminación de contaminantes en procesos industriales, la adsorción de compuestos orgánicos y químicos en diferentes contextos, y más. Sin embargo, la implementación exitosa de esta técnica requeriría una investigación y desarrollo cuidadosos para optimizar los procesos y garantizar la calidad y eficacia del carbón activado resultante.

En su investigación Pérez y col (Pérez Macedo , Hernández Arrazola, & Aquino González , 2017) en el cual se llevó a cabo el proceso de fabricación de carbón activado a partir del bagazo de agave angustifolia (CAB) Demostró que su Carbón Activado obtenido del bagazo de agave angustifolia (CAB) posee características de porosidad similares al Carbón Activado comercial, además en sus pruebas de rendimiento evidencia que el CAB fue capaz de eliminar el 95% de la concentración inicial de naranja de metileno, y debido a esta propiedad podría tener usos en la adsorción de potencial de colorantes y otras sustancias contaminantes.

Por su parte Rangel Heredia, (Rangel Hereida, 2019) en su tesis de maestría produjo electrodos de carbón Activado obtenido del bagazo para su utilización en capacitores electroquímicos. Los resultados del estudio mostraron que los electrodos de carbón activado de bagazo de agave tenían una capacidad de 270 F/g^{-1} , una densidad de energía de 11 mW/cm^2 y una vida útil de 150 horas. Estos resultados son comparables a los de otros electrodos de carbón activado, lo que demuestra que los electrodos de bagazo de agave son una alternativa prometedora para su uso en dispositivos de almacenamiento de energía.

Por todo esto, este proceso de producción de carbón activado podría ser muy útil para la logrando así una doble valoración de este residuo que es una gran fuente de materia prima.

Fuente como Combustible vegetal

Debido a sus características y su abundancia del bagazo de agave como residuo aun después de la obtención de bioetanol. Puede ser utilizado como fuente de combustible vegetal puesto que si es gestionado de manera efectiva podría ser una alternativa más sostenible que la quema de combustibles fósiles

Chávez y col. (Chávez Guerrero & Hinojosa , Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands, 2010) en su estudio realizaron una investigación para conocer el poder de combustión del bagazo de *agave salmiana*, compararon además el estos valores en el bagazo seco y en el bagazo ya pirolizado o convertido en Carbón. Los resultados de la calorimetría diferencial de barrido (DSC) revelaron diferencias en los valores de calor de combustión. El bagazo pirolizado ($19,36 \text{ MJ/kg}$) tenía un valor más alto que el bagazo ($9,55 \text{ MJ/kg}$) o la fibra ($8,4 \text{ MJ/kg}$). Los resultados de este estudio son prometedores, ya que sugieren que los residuos de la producción de mezcal podrían utilizarse como fuente alternativa de combustible.

Sin embargo, hay desafíos asociados con el uso del bagazo de agave como combustible vegetal, aunque el bagazo de agave es un subproducto, su conversión en combustible aún podría tener impactos ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero durante su procesamiento y combustión. Su viabilidad dependerá de factores como la tecnología disponible, la inversión económica, la demanda de energía renovable y la sostenibilidad ambiental. (Chávez Guerrero L. , Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands, 2010)

Compostaje de los residuos de bagazo y su utilización como biofertilizante.

El compostaje de bagazo de agave es un proceso mediante el cual se descompone y transforma en compost, un material orgánico rico en nutrientes que se puede utilizar como fertilizante en la agricultura y la jardinería. Este proceso no solo reduce los residuos en la industria de la producción de tequila y mezcal, sino que también proporciona un recurso valioso y sostenible para mejorar la salud del suelo y promover prácticas agrícolas más ecológicas.

Crespo Gonzáles y col (Crespo Gonzáles, González Eguiarte, & Rodríguez Macías, 2013) realizaron un análisis de tres tipos de compost de bagazo de agave con diferentes periodos de almacenamiento. con el propósito de emplear el bagazo de agave como un material orgánico alternativo para el cultivo de tomates *Solanum lycopersicum L*, los tiempos de almacenamiento fueron de 0, 90 y 180 días. Evaluaron las propiedades fisicoquímicas de cada compost y realizaron pruebas como sustratos en el cultivo de tomates en invernaderos controlados. De acuerdo con su investigación el compost con 180 días de almacenamiento presentó una granulometría más favorable lo que contribuyó a mejorar sus propiedades físicas y en la relación aire – agua, así mismo este sustrato obtenido del bagazo de agave demostró un rendimiento superior al obtenido con el sustrato de polvo de coco con el cual se compararon los sustratos obtenidos. Cabe resaltar que el compost con 180 días de almacenamiento mostro el rendimiento más alto de los tres sustratos siendo este el de 3.5 kg por planta y también la mayor cantidad de tomates cosechados siendo estos de 26.4 frutos por planta.

El proceso de compostaje del bagazo de agave implica la descomposición microbiana de la materia orgánica en presencia de oxígeno. Existen algunas etapas básicas involucradas en el compostaje del bagazo las cuales varían dependiendo del método utilizado, pero generalmente se pueden resumir en:

Pretratamiento: como la trituración que es útil para aumentar la superficie de contacto y acelerar el proceso de descomposición.

Mezclado: El bagazo triturado se puede mezclar con otros materiales orgánicos que ayudaran a mejorar la descomposición pues portar más nutrientes para los microorganismos que llevan a cabo la degradación, se pueden utilizar restos de comida, hojas, frutas.

Aireación y humedad: Es importante mantener una buena ventilación dentro de la pila de compostaje para asegurar que haya suficiente oxígeno para las bacterias y otros microorganismos descomponedores. El bagazo de agave debe mantenerse húmedo,

pero no empapado. La humedad adecuada es esencial para el crecimiento de los microorganismos

Sin embargo, uno de los problemas en el compostaje del bagazo de etanol es el tiempo ya que debido a su estructura el lapso requerido para el compostaje varía, pero generalmente lleva varios meses hasta un año para que el bagazo de agave se descomponga completamente en un compost maduro y estable.

Con el fin de reducir los tiempos de composteo del bagazo de agave que es estimado de 7 a 9 meses (Moran Salazar, Prado Ramírez , & Flores Montaña, 2013) en su investigación llevaron a cabo un pretratamiento con *Bjerkandera* adusta especie de hongo en la familia Meruliaceae por 45 días, seguido de un proceso de vermicompostaje con *Eisenia fétida* (lombriz de tierra roja).

En su investigación también evaluó la descomposición de la hemicelulosa, celulosa, lignina, carbono orgánico y carbohidratos totales, así como la actividad enzimática de ligninoperoxidas, manganeso peroxidasa y lacasa en intervalos de 0, 30 y 45 días.

También se analizaron los parámetros de madurez y estabilidad del biofertilizante. La mayor tasa de descomposición en el pretratamiento se observó en el bagazo fraccionado tratado con *B. adusta* y hongos nativos, con valores para la hemicelulosa del 72%, celulosa del 43% y lignina del 70% durante los 45 días. En el vermicompostaje, la degradación fue más notable en el bagazo fraccionado pretratado con *B. adusta* y hongos nativos (hemicelulosa 93%, celulosa 93% y lignina 76%), en comparación con los hongos nativos (hemicelulosa 94%, celulosa 86% y lignina 91%). Adicionalmente, se logró obtener un biofertilizante maduro y estable en un lapso de 90 días. Mediante un proceso de vermicompostaje acelerado con *B. adusta*, se logró reducir el tiempo de degradación del bagazo de agave de 8 meses a 3 meses.

Alimento para rumiantes

Otro uso que ha tomado relevancia en los últimos años para el bagazo de agave es ser utilizado como alimento para rumiantes en ciertas circunstancias. Los rumiantes son animales tales como las vacas, cabras y ovejas que tiene un sistema digestivo especial que les permite descomponer y fermentar alimentos fibrosos como el bagazo.

Sin embargo, las investigaciones recientes demuestran que hay que considerar varios factores antes de utilizar el bagazo de agave como alimento para rumiantes tales como:

Valor nutricional: Se debe desarrollar investigaciones para conocer el valor nutricional del bagazo puesto que es posible que carezcan de ciertos nutrientes esenciales que los rumiantes necesitan tales como proteínas.

Tratamientos y procesamiento: Antes de ofrecer el bagazo a los rumiantes, podría ser necesario someterlo a algún tipo de procesamiento o tratamiento para mejorar su digestibilidad y valor nutricional. Esto podría incluir tratamientos para descomponer parte de la fibra y hacerla más accesible para los microorganismos del rumen de los animales.

Suplementación: Si el bagazo de agave es utilizado en la dieta de los rumiantes es probable que sea necesario complementarlo con otros alimentos y suplementos para asegurar los nutrientes necesarios para la buena alimentación de los animales,

En su investigación Delgadillo Ruiz y col. (Delgadillo Ruiz, Bañuelos Valenzuela, Esparza Ibarra, & Gutiérrez Bañuelos, 2015) realizaron un perfil bromatológico del bagazo de *Agave salmianay* *Agave webericela* para conocer sus propiedades nutrimentales como alternativa para la alimentación de los rumiantes. Descubrieron que el bagazo representa una fuente natural de calcio, por lo que indican que en las estaciones de sequía los requerimientos de calcio en la alimentación de los rumiantes pueden ser cubiertos por el bagazo de agave. En cuanto a los resultados reportados de proteína cruda reportados en el perfil bromatológico demostraron que este nutriente no es suficiente para aumentar el metabolismo bacteriano del rumen, no obstante, la fermentación de estado sólido al agregar urea ha demostrado aumentar la proteína cruda. Finalmente concluyen que tanto los FDN (Fibra de detergente neutro) que es una medida de la fibra utilizada para el análisis de la alimentación animal mide componentes de lignina, celulosa, y hemicelulosa, sugieren que estos subproductos pueden ser utilizados en las temporadas de sequía, Además, en términos de su degradabilidad in vitro y la energía producida (AGV), se sugiere que estos residuos de plantas tienen el potencial para satisfacer los requerimientos nutricionales de los rumiantes en términos de mantenimiento.

Finalmente, la valorización del bagazo de agave representa una estrategia importante para la sostenibilidad y la generación de ingresos en la industria agroalimentaria. Al aprovechar las diversas aplicaciones de este subproducto, no solo se reducen los residuos y se promueve la circularidad, sino que también se generan oportunidades económicas y se contribuye a la conservación del medio ambiente. Esta investigación subraya la importancia de considerar el bagazo de agave como un recurso valioso en lugar de un residuo desechable.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvira, P., Tomás, E., Ballesteros, M., & Negro, M. (2009). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis. *Bioresource Technology*, 4851-4861.
- ARELLANO PLAZA, M. (2022). Mezcal Production in Mexico: Between Tradition and Commercial Exploitation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8-10.
- Chandler, C., Villalobos, N., & Gonzales, E. (2012). Hidrólisis ácida diluida en dos etapas de bagazo de caña de azúcar para la producción de azúcares fermentables. *Multiciencias*, 246-252.
- Chávez Guerrero, L. (2019). Uso del Bagazo de la industria mezcalera como materia prima para generar energía. *Repositorio Académico Digital, Universidad Autónoma de Nuevo León*, 8-16.
- Chávez Guerrero, L., & Hinojosa, M. (2010). Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands. *Fuel*, 4049-4052.
- Chávez Guerrero, L. (2010). Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands. *Fuel*, 4049-4052.
- Crespo Gonzáles, M., González Eguiarte, D., & Rodríguez Macías, R. (2013). Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1161-1173.
- Cruz, H., Enríquez, J., Velasco, V., & Aquino, D. (2013). Nutrientes y carbohidratos en plantas de Agave angustifolia Haw. y Agave karwinskii Zucc. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1-3.
- De la Cerna, K. (2016). Fabricando bioetanol. *Oficina de Comercialización de Tecnología, Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento BUAP*, 10-11.
- Delgadillo Ruiz, L., Bañuelos Valenzuela, R., Esparza Ibarra, E., & Gutiérrez Bañuelos, H. (2015). Evaluación del perfil de nutrientes de bagazo de agave como alternativa de alimento para rumiantes. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2099-2103.
- Flores Ríos, P. A., Robles, C., & Castañeda, E. (2020). Generación y caracterización básica de bagazos de la agroindustria del mezcal en Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1.
- Gallardo, J. (2017). Industria del tequila y generación de residuos. *Ciencia y desarrollo CONACYT*, 2-4.
- Gonzales, Y., Gonzales, O., & Nungaray, J. (2005). Potencial del Bagazo de agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *e-Genesis*, 1-5.

- Guarnizo Franco, A., Martínez Yépes, P., & Valanecia Sánchez, H. (2009). Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Scientia Et Technica*, 284-288.
- Hernández, M. (2007). Tendencias actuales en la producción de Bioetanol. *Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar*, 5-11.
- Hidalgo, M., Caballero, M., & Hector, L. (2015). Chemical and morphological characterization of agave angustifolia bagasse fibers. *Ciencia Botánicas IPN*, 1-2.
- Masaguer, A., Gomez, M., Cámara, J., Zárate, B., & Eymar, E. (2014). Valorización de bagazo de maguey compostado en mezclas para sustrato de cultivo en Oaxaca (Mexico). *VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas* (págs. 1487-1492). España: Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Méndez, C., Briones, A., Sandoval, F., & Perez, A. (2018). Optimización de la sacarificación de productos amiláceos para la producción de bioetanol. *Revista de Tecnologías en Procesos Industriales*, 32.
- Moran Salazar, R., Prado Ramírez, R., & Flores Montaña, J. (2013). Producción de un biofertilizante a partir de bagazo de agave con un proceso de vermicomposteo acelerado utilizando Bjerkandera adusta. *3er Congreso Nacional de Mitigación Ambiental en el sector Agropecuario de México* (págs. 1-13). Guadalajara, Jalisco: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco,.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., & Lee, Y. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 670-687.
- Norma Oficial Mexicana. (2011). NOM-161-SEMARNAT-2011. *Que establece los criterios para clasificar los residuos de Manejo Especial y determinar cuales estan sujetos a planes de Manejo; el listado de los mismos para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos de Planes.*
- Norma Oficial Mexicana. (2016). NOM-070-SCFI-2016. *Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones.*
- Pérez Macedo, P., Hernández Arrazola, S., & Aquino González, L. (2017). Propiedades Adsorptivas del Carbón Activado Obtenido a partir de Bagazo de Agave y Cascarón de Huevo. *MEMORIAS DEL XIX CONCURSO LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN*, 15-18.
- Rangel Hereida, I.-K. (2019). Carbón activado nanoporoso preparado a partir de bagazo de agave (agave tequilana) utilizando KOH como agente activante y su potencial aplicación en capacitores electroquímicos. *Repositorio Academico Digital Universidad Autónoma de Nuevo León*, 1-92.
- Ríos, S., Enríquez, J., Rodríguez, G., & Luna, J. (2021). El crecimiento de Agave angustifolia Haw. con relación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1-2.
- Sarkar, N., Kumar, S., & Banerjee, S. (2011). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 27.

- Sierra, E., Alcaraz, J., Valvidia, A., & Rosas, A. (2021). Bagazo de agave: de desecho agroindustrial a materia prima en las biorrefinerías. *Ciencia UNAM*, 2-5.
- Solis Santeliz, L. (1983). Tesis Construcción de una torre de destilación de platos perforados. *Universidad de Sonora*, 139-140.
- Tejada, L., Quintana, J., & Pérez, J. (2011). Obtención de bioetanol a partir de los residuos de poda, mediante hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 111-116.
- Verdugo Valdez, A., & Segura García, L. (2011). Yeast communities associated with artisanal mezcal fermentations from Agave salmiana. *Antonie van Leeuwenhoek*, 497–506.