



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA EN ENERGÍA
SISTEMAS ENERGÉTICOS – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL AGAVE CON FINES
ENERGÉTICOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GABRIELA RUIZ RENDÓN

TUTOR PRINCIPAL
SERGIO ALBERTO GAMBOA SÁNCHEZ, IER-UNAM

Cd. Mx. Enero 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: JOSEPH SEBASTIAN PATHIYAMATTOM, IER-UNAM

Secretario: MARÍA DEL ROCÍO NAVA LARA, IER-UNAM

1 er. Vocal: SERGIO ALBERTO GAMBOA SÁNCHEZ, IER-UNAM

2 do. Vocal: ADRIANA M. LONGORIA HERNÁNDEZ, IER-UNAM

3 er. Vocal: LAURA ALICIA PANIAGUA SOLAR, BUAP

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Temixco, Morelos

TUTOR DE TESIS: Sergio Alberto Gamboa Sánchez

NOMBRE

FIRMA

(Segunda hoja)

DEDICATORIA

A las lectoras y los lectores.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), instituciones en las que cursé la maestría en ingeniería en energía, que me brindaron las herramientas y me formaron durante mis estudios de posgrado con los más altos estándares educativos y valores universitarios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por los 4 semestres de beca, que me permitieron dedicarme de tiempo completo a mis estudios de posgrado. También deseo agradecer el financiamiento obtenido de la primera etapa del proyecto sometido a la Convocatoria PRONACES FORDECyT-2020-05 titulado *“Paquete energético para la mejora del proceso de producción del alcohol de agave y el aprovechamiento de residuos como biocombustibles”*, con número de proyecto 315075, que dio lugar a la generación de conocimiento y productos académicos como este trabajo de tesis.

A mi tutor el Dr. Sergio Alberto Gamboa, por su mentoría, guía y formación a lo largo de este proceso y los proyectos derivados que hemos podido realizar, así como al Mtro. Carlos Díaz Gómez del grupo de investigación por facilitar la obtención de datos de campo.

Al jurado de tesis, las doctoras Ma. Del Rocío Nava Lara, Adriana M. Longoria Hernández, Laura A. Paniagua Solar y al doctor Joseph Sebastian Pathiyamattom por su colaboración, revisión y aprobación del trabajo de tesis.

Al M.I. Juan Carlos Castro Domínguez por su valioso apoyo y asesoría en el procesamiento e interpretación de datos.

A la comunidad científica que hizo posible la vida académica virtual y una nueva normalidad para las actividades presenciales durante mi estadía en el posgrado.

A las mujeres de mi vida.

A mis padres y hermanos.

Contenido

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Pobreza energética.....	11
1.2 Las energías renovables y los biocombustibles.....	12
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	13
2.1 Antecedentes históricos del agave.....	13
2.2 Industria y mercado del agave.....	15
2.3 Planteamiento del problema.....	16
2.3.1 Sobreexplotación del maguey.....	16
2.3.2 Uso no sustentable y escasas de leña.....	16
2.3.3 Generación de residuos.....	17
2.4 Hipótesis.....	20
2.5 Objetivos.....	20
Capítulo 3. MARCO TEÓRICO	21
3.1 Proceso de producción del mezcal.....	21
3.2 Bagazo.....	22
3.3 Vinaza.....	24
3.4 Digestión anaerobia.....	27
3.5 Codigestión.....	29
3.6 Normativa aplicable.....	30
3.6.1 Clasificación y denominación de origen.....	30
3.6.2 Límites permisibles en aguas residuales.....	32
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	33
CAPÍTULO 5. DESARROLLO	35
5.1 Diagnóstico del problema: Acercamiento a la comunidad mezcalera de Tixtla, Guerrero	35
5.2 Levantamiento técnico de datos de la producción de mezcal y ruta crítica.....	37
5.3 Descripción del proceso (balance de masa).....	40
5.4 Descripción del proceso (balance energético).....	41

5.5 Banco de datos de bagazo y vinaza.....	44
5.6 Propuesta de uso de residuos líquidos (vinaza)	49
5.7 Recomendaciones de mejora en la eficiencia energética del proceso.	52
6.1 Diagnóstico del problema: Acercamiento a la comunidad mezcalera de Tixtla, Guerrero	53
6.2 Descripción del proceso (balance de masa).....	55
6.3 Descripción del proceso (balance energético)	57
6.4 Propuesta de uso de residuos líquidos (vinaza)	62
6.5 Estimación del potencial energético de los residuos.	69
6.6 Recomendaciones de mejora en la eficiencia energética del proceso	70
CONCLUSIONES	71
REFERENCIAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Objetivos de Desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas.

Figura 2.1 Gráfica de estacionalidad de exportaciones de tequila y mezcal.

Figura 2.2. Piñas después del rasurado.

Figura 2.3. Bagazo.

Figura 2.4. Vinazas.

Figura 3.1 Vinazas vertidas en los campos de cultivo.

Figura 5.1 Apilación de rocas, leña y cabezas en el horno.

Figura 5.2 Cocción de las piñas con horno cerrado.

Figura 5.3. Preparación de piñas cocidas para la fermentación.

Figura 5.4. Proceso de fermentación de las piñas.

Figura 5.5 Equipo de destilación del fermentado.

Figura 6.1 Percepción de las problemáticas detectadas en la mezcalería.

Figura 6.2. Percepción de la mezcalería en la comunidad.

Figura 6.3 Percepción de las energías renovables en la comunidad.

Figura 6.4 Diagrama de flujo de la obtención de mezcal en términos de masa.

Figura 6.5 Diagrama de sankey del flujo de masa durante el proceso de obtención del mezcal.

Figura 6.6. Diagrama de flujo de energía en la obtención de mezcal.

Figura 6.7 Distribución de la energía en el horneado

Figura 6.8 Distribución de la energía en el fermentado.

Figura 6.9 Distribución de la energía en el primer destilado.

Figura 6.10 Distribución de la energía en el segundo destilado.

Figura 6.11 Flujo de energía del proceso de obtención de mezcal.

Figura 6.12 Propuesta de codigestión No. 1 (45% vinaza, 50% estiércol porcino, 5% bagazo)

Figura 6.13 Propuesta de codigestión No. 2 (20% vinaza, 30% porcino, 40% hortalizas, 10% inóculo estabilizado).

Figura 6.14 Propuesta de codigestión No. 3 (5% vinaza, 45% bagazo, 50% excreta humana).

Figura 6.15 Relación C/N de las propuestas de codigestión.

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Componentes químicos regulados y sus niveles mínimos y máximos permisibles en las NMX.

Tabla 3.2 Parámetros establecidos en la NOM-064-ECOL-1994 para la descarga de aguas residuales de la destilería.

Tabla 5.1 Parámetros del cálculo energético.

Tabla 5.2 – Relación C/N diferentes biomاسas

Tabla 5.3 – Caracterización del inóculo.

Tabla 5.4 – Características de diferentes tipos de vinaza (sólidos totales, pH y DQO).

Tabla 5.5 – Características de diferentes tipos de bagazo.

Tabla 5.6 Producción de biogás de diferentes especies.

Tabla 5.7 Propuesta de codigestión con vinaza al 45%.

Tabla 5.8 Propuesta de codigestión con vinaza al 20%.

Tabla 5.9 Propuesta de codigestión con vinaza al 5%.

Tabla 6.1 Porcentaje de ST y cantidad de agua añadida, propuesta 1.

Tabla 6.2 Porcentaje de ST y cantidad de agua añadida, propuesta 2.

Tabla 6.3 Porcentaje de ST y cantidad de agua añadida, propuesta 3.

Tabla 6.4 Dimensionamiento de un biodigestor para el total de biomasa líquida generada.

Tabla 6.5 Dimensionamiento de un biodigestor para la mitad de biomasa líquida generada

RESUMEN

La generación de residuos en la industria mezcalera es un problema que se ha abordado desde diferentes áreas. En este trabajo se estudia este problema desde el área de energía, centrándose en el uso de los residuos líquidos (vinazas) como biomasa para la codigestión y la obtención de biogás como una fuente renovable de energía para el proceso de producción del alcohol de agave. Este estudio contempló la recopilación de datos de campo en la comunidad mezcalera de Tixtla, Guerrero, un análisis teórico del uso de energía y masa para el proceso que va desde el horneado, hasta la destilación. Fue posible estimar la cantidad generada de residuos que representa el 94% de la masa de entrada (donde el 59% corresponde a la vinaza) y una eficiencia energética del proceso del 9.44%. Se calcula que tan sólo los residuos sólidos tienen el potencial energético para abastecer 2.3 veces la demanda energética del proceso (504 GJ). Existen áreas de oportunidad en todo el proceso de producción, que pudieran eficientar el uso de la energía, más allá del 30%, sin tener la necesidad de modificar el proceso artesanal.

Palabras clave: agave, mezcal, residuos, biomasa, vinaza, bagazo, eficiencia energética.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Pobreza energética

La energía nos ayuda a subsistir y cubrir necesidades como la alimentación, comunicación, confort térmico, higiene, entretenimiento, etc., y la falta de acceso limita el desarrollo y bienestar del ser humano.

El término de *pobreza energética* se refiere a una situación de carencia y/o insuficiencia para acceder o pagar los servicios energéticos básicos y de buena calidad en el hogar (ONPE, 2022).

Una entidad con cierto grado de pobreza energética se enfrenta a un problema multidimensional y transversal que se considera como una situación de vulnerabilidad energética, es decir, es más propensa a los cambios y eventos adversos

Esto se traduce en un alto riesgo de caer en trampas en términos económicos, sociales, ambientales y de gobernanza y que dichos efectos se vean reflejados en su acceso a la energía (Gatto and Bussato, 2020).

En México, alrededor del 4% de la población tiene dificultades de incorporación a la red eléctrica, servicio de mala calidad o nulo acceso a ella (Serra, 2021) mientras que el 36.7% de los hogares se privan de algún bien económico (iluminación, climatización, etc) por no tener energía suficiente para abastecer dichas necesidades (Soto, 2020).

En este sentido, el objetivo número siete de los 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS), de la Organización de Naciones Unidas (ONU), (Figura 1.1) se refiere a “la energía asequible y no contaminante”, lo que coloca en un marco internacional la urgencia para garantizar un acceso universal a los servicios de energía limpia y de calidad.

El uso de las energías renovables es una de las vías principales para el cumplimiento de las metas del séptimo objetivo, por lo que se considera que es posible estimular el crecimiento económico y social con el menor impacto ambiental a través de los proyectos de inversión en tecnologías de fuentes limpias de energía, así como en la productividad y eficiencia de los sistemas energéticos.



Figura 1.1. Objetivos de Desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas
(Foto: UN)

1.2 Las energías renovables y los biocombustibles

Las tecnologías de fuentes renovables de energía nos permiten aprovechar diferentes recursos que al ser utilizados de forma sustentable conllevan beneficios ambientales, económicos, tecnológicos y sociales.

Hoy en día, no basta con que los residuos generados de cualquier actividad sean separados y dispuestos de forma adecuada, sino que es necesario que se aprovechen como materia prima para la generación de subproductos de valor agregado, alargando así su ciclo de vida útil y disminuyendo su huella de carbono. Tal es el caso de la transformación de la biomasa en biocombustibles.

La biomasa tiene origen en la materia orgánica rica en lípidos, proteínas y/o carbohidratos contenida en alimentos, cultivos energéticos y microalgales, residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de la industria, agricultura, ganadería y actividad doméstica. Dependiendo de su contenido, esta materia puede ser transformada en biodiesel, bioetanol, biogás, biometano, bio-hidrógeno, etc., utilizados de manera directa, con tecnologías adaptadas o en mezcla para la combustión, generación de energía térmica o eléctrica.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Antecedentes históricos del agave

El origen del maguey data de hace unos 14,000 años, se tiene registro de que en los vestigios de los antiguos habitantes se encontraron rastros de hornos para la cocción del maguey, así como herramientas para el “despulpe” desde el año 400 a.C. En México se conoce su uso desde hace 10,000 años.

Los indígenas se refieren a él como *metl* en náhuatl, *tacamba* en purépecha, *huadá* en otomí o *doba* en zapoteco, no fue hasta la llegada de los españoles que se acuñó la palabra *maguey*, “sola (esta planta) podría fácilmente proporcionar todo lo necesario para una vida frugal y sencilla, pues no la dañan los temporales ni los rigores del clima, ni la marchita la sequía”, escribió Francisco Hernández de Toledo en 1577, en su libro *Historia natural de Nueva de España* (Scheinvar, 2021).

Existen diferentes tipos de agave y México posee el 75% de las especies del mundo, que equivalen a aproximadamente a 200, distribuidas en todo el territorio (García Méndoz, 2018). Gracias a esta riqueza y al uso de todas sus partes (hojas, flores, tallos, pedúnculo y raíces) el agave se conoce como el *árbol de las maravillas*. Su principal uso es la obtención de destilados de alcohol, pero abarca desde los usos alimenticios, medicinales, creación de fibras como el ixtle y materiales de construcción, entre otros.

Para algunas regiones el aprovechamiento del agave constituye la principal fuente de ingresos, así como una de las principales herencias culturales y gastronómicas para los mexicanos, junto con el chile, el maíz y el nopal.

El agave es la materia prima para la elaboración diferentes bebidas alcohólicas tales como el mezcal (del nahuátl *mexcalli* -agave horneado-), tequila, bacanora, charanda y sotol que cuentan con denominación de origen en al menos 12 estados de la república, (así como el Whiskey escocés en Reino Unido o el oporto en Portugal).

Existen además, otros licores ancestrales y artesanales obtenidos a partir de la planta del maguey, cada especie provee de un licor distinto por lo que su variedad va de los 56 a los

200 tipos de alcoholes (Manrique *et al.*, 2021). El bagaje e importancia cultural y social, además de su uso ceremonial en algunas regiones, hace que estas bebidas sean llamadas “espirituosas”.

Los tallos de la planta se someten a un proceso de cocción en un horno bajo tierra, típicamente de leña, cubierto con las cabezas de maguey, para su posterior fermentación y destilación de dónde se obtienen los alcoholes, esta última parte puede ir acompañada de otros productos para darle un toque de sabor diferente: frutas, hierbas, pechuga de pollo, etc.

Dicho proceso puede ser llevado a cabo de forma ancestral, artesanal o industrial en función de los materiales, maquinaria y tamaño de la producción.

2.2 Industria y mercado del agave

El mezcal y el tequila son los destilados de agave más consumidos a nivel nacional e internacional, siendo mayo el mes de mayor producción y exportación de tequila y noviembre en el caso del mezcal (Figura 2.1). Se estima que durante el periodo de 2016-2030 la producción potencial de agave crezca un 27.13% (SAGARPA, 2017).

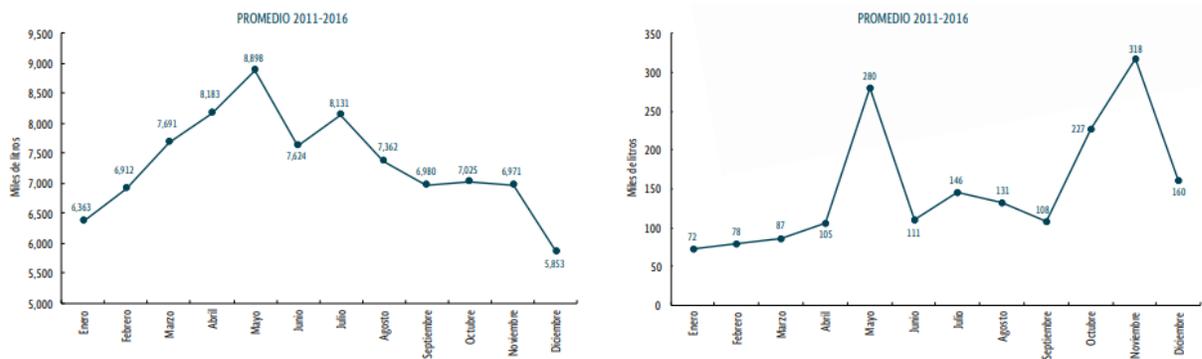


Figura 2.1 Gráfica de estacionalidad de exportaciones de tequila y mezcal. Fuente: (SAGARPA, 2017).

Estados Unidos es el principal importador de estos licores, seguido de Alemania y Taiwán sin embargo, debido a los tratados de libre comercio su alcance ha llegado a más de 26 países de Europa, Asia y América que anualmente consumen más de 186 millones de litros.

En el Programa de Planeación Agrícola Nacional 2017-2030 se estableció que algunos de los principales ejes de acción para maximizar el desarrollo productivo nacional de la industria del agave son:

- Impulsar acciones para garantizar la sustentabilidad de la agroindustria, así como identificar y reactivar proyectos viables de apoyo a la agroindustria.
- Impulsar la investigación y el desarrollo tecnológico a favor del agave.

2.3 Planteamiento del problema

2.3.1 Sobreexplotación del maguey

El Instituto de Biología de la UNAM en el informe de actualización de información de especies y subespecies de magueyes (García Méndoza, 2018) reportó que es cada vez más común la compra de magueyes de otras localidades debido a la **sobreexplotación de las especies locales** y la falta de propagación por semilla.

Al evaluar el grado de erosión genética de las poblaciones explotadas para la producción de bebidas espirituosas se encontró una disminución de las poblaciones silvestres y el peligro de su conservación a largo plazo, debido a que la recolección de las especies se realiza antes de completar su ciclo de reproducción sexual, por lo que se pone en riesgo su diversidad genética (Chavez-Parga, Pérez Hernández and González Hernández, 2016).

Esta práctica repercute de forma negativa a la reproducción del agave, así como a los factores de regulación y sostenimiento naturales, al desplazamiento de cultivos alimentarios y variedades tradicionales, genera contaminación química, afecta el desarrollo de procesos evolutivos y pone en riesgo a la fauna silvestre que forma parte del ecosistema del maguey.

2.3.2 Uso no sustentable y escasos de leña

El proceso de elaboración del mezcal requiere tres elementos principales: agave, agua y un combustible, este último es leña en la gran mayoría de los casos, lo que otorga un sabor distintivo a las bebidas, pero implica un **uso cada vez mayor de biomasa forestal**, ya que a decir de los mezcaleros “cada vez es más difícil conseguir la misma cantidad de leña y cada vez se tiene que ir más lejos”, es decir que la escasez requiere un gasto adicional de horas hombre en la recolección de la materia prima y causa un mayor impacto ambiental en el ecosistema, al hacer uso de esta como una fuente no sustentable de energía.

La leña, de acuerdo con mezcaleros y consumidores de las bebidas, otorga un sabor característico al mezcal en el proceso de cocción y destilación, por lo que prescindir totalmente de ella no sería una solución viable.

2.3.3 Generación de residuos

En esa misma línea, el gran auge de la industria tequilera y mezcalera en los últimos años ha traído beneficios sociales, culturales, económicos y a su vez un problema de **generación de residuos** de la misma escala.

Los residuos generados en la producción de destilados del maguey van desde las cabezas sobrantes y las piñas luego de ser talladas (sólo algunas se utilizan en el proceso de cocción y destilación), hasta el bagazo — residuos sólidos — y las vinazas —residuos líquidos — como restos de la trituración, fermentación y destilación (Figuras 2.2, 2.3 y 2.4). Se calcula que por cada litro de tequila se producen de 3.5 a 7 kg de bagazo (Crespo González *et al.*, 2018) y entre 10 y 15 litros de vinazas (Ordaz Díaz *et al.*, 2019), (Gallardo Valdez, 2019).



Figura 2.2. Piñas después del rasurado (Foto: Pexels).



Figura 2.3. Bagazo. (Foto: Ciencia y Desarrollo, 2019)



Figura 2.4. Vinazas (Foto: El occidental, 2019)

Las principales zonas mezcaleras en México se encuentran en estados con altos índices de pobreza, siendo Chiapas, Guerrero y Oaxaca los que encabezan el índice estatal de pobreza energética en el hogar, con un nivel de rezago clasificado como -muy alto- (García-Ochoa and Graizbord, 2016).

Los pequeños productores en su mayoría procuran mantener vivas sus tradiciones y costumbres mientras proveen a sus familias de sustento y buscan mejores condiciones de vida a través de la producción artesanal de alcoholes, sin embargo, esta vulnerabilidad dificulta que esta importante actividad cultural y económica sea sostenible y provea de mejores condiciones de vida.

Es por esto, que se vuelve necesaria una alianza estratégica para la formulación de mejoras tecnológicas a través de las energías renovables, que mejoren las condiciones de pobreza energética de las comunidades mezcaleras y a su vez disminuyan las repercusiones ambientales debidas al uso energético, pero sin afectar el proceso artesanal que da lugar al mezcal.

Guerrero es parte de las zonas estratégicas de crecimiento en las que se desea maximizar la producción de mezcal (SAGARPA, 2017) y es el segundo estado con mayor producción de

mezcal artesanal con 1.5 millones de litros al año elaborado por 500 fábricas, de las cuales 100 cuentan con certificación (SAGARPA, 2020).

El sabor y calidad que distingue al mezcal guerrerense se debe principalmente al tipo de agave cultivado en la región: el agave Cupreata, a diferencia de otras regiones como en Michoacán el agave alto o bruto (*inaequidens*) o en Oaxaca el agave espadín (*angustifolia*), (Manrique *et al.*, 2021).

El municipio de Tixtla se ubica en la región centro de Guerrero a 17 kilómetros de Chilpancingo la capital estatal, cuenta con un clima sub-húmedo que alberga especies como el venado, el tecolote, así como árboles de encino y zoyacahuite (INAFED, 2021) y al ser una región rica en recursos forestales, ríos y arroyos, alberga a una importante comunidad de mezcaleros expertos en la producción de esta bebida ancestral.

Según datos de Data México (Secretaría de Economía, 2022) al menos el 18% de la población se dedica a las actividades agrícolas y de cultivo, entre ellas el cultivo y procesamiento de agave para la obtención del mezcal.

La problemática particular y competente a este trabajo fue detectada a través del acercamiento con un palenque de la comunidad de Tixtla “Amores”. Entre los principales problemas para el crecimiento y sostenibilidad del proceso detectados por los propietarios y trabajadores se centran en la obtención de los recursos (leña como combustible) y la disposición de los residuos generados (vinaza y bagazo principalmente).

Las áreas de oportunidad se clasificaron en tres áreas principales, las técnicas, como la carencia de medición y monitoreo adecuados en el proceso de producción así como de una alternativa de disposición de residuos sólidos y líquidos, lo conlleva una fuente importante de contaminación del suelo y cuerpos de agua a nivel local (lechos de secado y disposición al aire libre) en el área ambiental y el área socio-económica la cual se centra en la situación de pobreza y la importancia de mantener las prácticas que sostienen la cultura del mezcal en la comunidad.

2.4 Hipótesis

Los residuos líquidos y sólidos de la producción del mezcal, al utilizarse como energéticos en el mismo proceso, disminuyen el uso de insumos utilizados como combustibles convencionales, convirtiéndose en un indicador positivo para mejorar las condiciones de pobreza energética de las comunidades mezcaleras.

2.5 Objetivos

Objetivo general

Analizar y proponer alternativas sustentables con base en tecnologías de fuentes renovables para la utilización de los residuos de agave, así como estrategias de eficiencia energética en el proceso de producción de mezcal.

Objetivos específicos

- Identificar las necesidades de la comunidad en términos energéticos y ambientales.
- Trazar una ruta crítica del proceso para identificar los puntos críticos de la cadena de producción.
- Analizar y plantear diferentes alternativas energéticas para el proceso y el uso de los residuos.
- Analizar y estudiar diferentes estrategias de eficiencia energética para el proceso de obtención del mezcal.
- Identificar la posible incorporación de las propuestas en el caso de estudio y cuál sería su impacto energético y ambiental.

Capítulo 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Proceso de producción del mezcal

El mezcal es obtenido de los azúcares fermentados de las cabezas cocidas del maguey, principalmente fructosa, glucosa, xilosa y maltosa. Este proceso comienza con la cosecha del agave maduro (10 a 25 años en especies grandes y 4 a 5 años en especies pequeñas) antes de la floración, asegurando la concentración de azúcares más alta en la planta.

El agave es cortado desde la base y se realiza un jimado o rasurado con machetes, coa y/o un hacha para retirar las hojas y la cabeza de la piña, la cual es transportada hacia el horno de cocción o autoclave para su tratamiento térmico. En esta etapa, los polisacáridos son hidrolizados como efecto de la temperatura y la acidez del jugo (Chavez-Parga, Pérez Hernández and González Hernández, 2016). Se ha reportado que, desde el punto de vista de la producción de etanol, las condiciones óptimas para la hidrólisis de los fructanos del agave se encuentran entre los 92 y 122 °C en un rango de cocción de 6 a 18 h (García-Soto *et al.*, 2011), (Whitaker *et al.*, 2017).

Las piñas cocidas se trituran a través de una molienda manual o auxiliada con un molino mecánico, preferentemente de piedra de alta densidad para incrementar la presión y extraer la mayor cantidad de mieles del bagazo (Durán and Pulido, 2007).

El resultado es un jarabe rico en fructuosa que se somete a una fermentación alcohólica (puede ser asistida por levaduras) en esta parte del proceso se pueden añadir otros componentes que definirán la productividad y características organolépticas finales de la bebida. Es recomendado que el proceso de fermentación se realice entre los 28 y 34.6 °C para maximizar la producción y la calidad del mezcal (De León-Rodríguez *et al.*, 2008).

Finalmente, el mosto o fermentado (2 a 13% v/v alcohol) se destila para obtener el mezcal, particularmente en esta bebida se puede realizar una doble destilación en alambique de cobre o de barro para resaltar el sabor, grados de alcohol (35-55 % v/v), (Chavez-Parga, Pérez Hernández and González Hernández, 2016) y su origen artesanal en el etiquetado. Es durante el rasurado y las últimas etapas de destilación que se obtienen el bagazo y la vinaza

como residuos sólidos y líquidos del procesamiento del agave. La rectificación y maduración del destilado se realiza de forma opcional y personalizada.

La etapa que más contribuye al impacto ambiental del mezcal es la manufactura/procesamiento, contribuyendo al 59.6%. La demanda energética por botella (de 750ml con 46% alcohol) es de 163.8 MJ. El kilogramo de CO₂ equivalente en la producción del mezcal (1.7) es más alto que la cerveza (0.63) o el vino blanco (1.01) pero menor al del whisky (2.25) o el pisco (3.62), estos datos reportados por Martínez et al. (Martínez *et al.*, 2020), incluyen parámetros como la obtención de semillas, uso de fertilizantes, herbicidas, insecticidas, transporte y energía así como materiales para las botellas y la cantidad de residuos generados por botella.

La etapa de destilación contribuye hasta en un 91.3% en el caso del mezcal ancestral y en un 89.8% en el mezcal artesanal al impacto ambiental de la elaboración del producto. Por lo que se cree que llevando a cabo más estudios en otras regiones y con mayor profundización en las variables utilizadas como en el caso de los procesos energéticos, se podría obtener una guía de prácticas amigables con el medio ambiente para la producción de mezcal que incluyan el uso de energías renovables, agricultura orgánica y/o manejo adecuado de residuos.

3.2 Bagazo

El bagazo es un residuo fibroso que posee características particulares como la resistencia a la acción de los microorganismos y una baja cantidad de nutrientes (Gómez G, 2014).

Es un material lignocelulósico, con la capacidad natural de adsorber cationes metálicos como cadmio, plomo y zinc, usualmente encontrados en aguas residuales, debido a su contenido de grupos carboxílicos (Velazquez-Jimenez, Pavlick and Rangel-Mendez, 2013).

En diferentes materiales lignocelulósicos, dichas características de adsorción han sido mejoradas con tratamientos y modificaciones que incluyen compuestos orgánicos, agentes oxidantes, soluciones básicas, ácidas y minerales.

Se calcula que anualmente en México se generan hasta 4.8 millones de ton de bagazo al año de la producción de mezcal (Gómez G, 2014) o alrededor de 16.5 ton de materia seca por unidad productiva promedio (Manrique *et al.*, 2021).

Este residuo produce problemas ecológicos debido a su baja tasa de degradación natural, y porque comúnmente se elimina quemándolo, convirtiéndose así en una fuente de contaminación atmosférica (Velazquez-Jimenez, Pavlick and Rangel-Mendez, 2013).

Por lo general el bagazo es depositado afuera de las fábricas de mezcal y para reducir su acumulación se ha recurrido a prácticas como la quema directa en calderas para el compostaje y como sustrato en la producción de otros cultivos como el tomate, en la alimentación animal (Ordaz Díaz *et al.*, 2019).

Al someterse a diferentes pretratamientos se ha logrado transformar en la fabricación de papel, muebles, forraje, material de construcción, sustrato en la producción de hongos (Gómez G, 2014), hierbas medicinales, papel artesanal, láminas para construcción, bolsas de plástico y tableros aglomerados para muebles mediante una mezcla con polímeros.

Se ha utilizado para la producción de enzimas como la inulasa y lacasa debido al contenido de inulina en la planta de agave (Trapala *et al.*, 2020).

Algunas de las soluciones más complejas y con fines energéticos para el tratamiento del bagazo han sido la pirolización a 450 °C para producir carbón, elevando su poder calorífico de 9.55 MJ/kg a 19.36 MJ/kg (Chávez-Guerrero and Hinojosa, 2010). Se ha evaluado su capacidad de sacarificación para su conversión en bioetanol, dando como resultado una potencial fuente de azúcares fermentables a través de la hidrólisis ácida y enzimática (Saucedo-Luna *et al.*, 2010).

3.3 Vinaza

Las vinazas son aguas residuales recalcitrantes, ricas en materia orgánica, ácidas y descargadas a una temperatura de aproximadamente 90 °C (Iñiguez and Hernández, 2010). Son los líquidos residuales obtenidos después de destilar el mosto fermentado, están compuestas por fibrillas de agave, células de levadura, ácidos, esteroides, alcoholes superiores y sustancias que le dan un color pardo.

Al tener una alta concentración de material orgánico en suspensión y descargarse a altas temperaturas, sin el tratamiento previo adecuado provoca cambios negativos en la microbiota de la superficie —consorcio de bacterias que mantiene las características naturales del suelo— y contamina los cuerpos de agua (véase figura 3.3).

El pH de las vinazas se encuentra entre 3.5-5, lo que se considera un medio ácido para la descarga directa sumado a su alto contenido en materia orgánica recalcitrante y tóxica (Palacios-Bereche, Palacios-Bereche and Nebra, 2020). Esta presenta una alta conductividad (250-300 dS/m) debido a su alta concentración de sales minerales. Contiene una alta concentración de fósforo y nitrógeno lo que puede causar la eutrofización de los cuerpos de agua y reservorios (León *et al.*, 2020) y aumentar la salinidad del suelo (Tadeu, Loureiro and Zaiat, 2018). Además, su contenido es rico en sustancias como el ácido acético, ácidos lácticos, glicerol, fenoles, polifenoles, melanoidinas, sustancias inorgánicas como sulfatos y sales de fosfato, dependiendo del tipo de agua de alimentación y de las sustancias añadidas al proceso (azúcares, sales, etc.).

La descarga de vinazas en suelos provoca la inhibición del proceso de germinación (Figura 3.1). Esto se debe a una reducción en la alcalinidad en el suelo, causando una deficiencia de manganeso que no es recomendable en los cultivos

La temperatura de la vinaza a la salida del proceso se encuentra entre los 50 - 80 °C (Robles-González *et al.*, 2012). Este residuo posee características particulares ampliamente estudiadas: en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO) se reportan valores desde 35,000 mg O₂/L hasta 150,000 mg de O₂/L y en cuanto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se han reportado desde 22,000 hasta 50,000 mg de O₂/L (Gómez-Guerrero *et al.*,

2019), (Robles-González, Galíndez-Mayer and Rinderknecht-Seijas, 2012). Tan sólo en el año 2020 se calcula que fueron vertidos entre 43 y 76 millones de litros de vinaza provenientes de la producción total de mezcal (Deslandés, 2021), (Ordaz Díaz *et al.*, 2019).



Figura 3.1 Vinazas vertidas en los campos de cultivo (Foto: El occidental, 2019).

Actualmente se reportan diferentes usos y disposición de las vinazas, desde los de disposición inmediata y con fines no energéticos, como ser vertidas directamente a los campos de cultivo, como composta o en lechos de evaporación. En algunas de las grandes productoras de tequila como Casa Sauza reportan el uso de cañones aspersores para la evaporación de la fracción líquida y el riego previa estabilización y elevación del pH a 7 (Sauza, 2021). Hasta pretratamientos biológicos (Gómez-Guerrero *et al.*, 2019) enzimáticos, químicos e hidrotermales, obtención de enzimas, generación de subproductos como jarabe de alta fructosa, polímeros biodegradables y la obtención de prebióticos (López, 2020).

Asimismo se ha utilizado vinaza como medio de cultivo para el crecimiento de levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) (León *et al.*, 2020) dando una solución parcial a la disposición de vinazas de diferentes industrias, sin embargo, algunas de estas alternativas sólo ofrecen una solución temporal o requieren de altos niveles de energía.

Diferentes autores han abordado la problemática desde el área bioquímica y de ingeniería, con lo cual se ha comprobado que la vinaza puede ser utilizada como biocombustible de quema directa en calderas bagaceras con un equivalente al 31% del poder calorífico del bioetanol (Muñoz Solares, 2016).

La degradación de la vinaza de azúcar de caña por método Fenton ha demostrado reducir a un 48.10% la DQO mitigando el impacto ambiental de manera efectiva, pero sin aumentar los niveles de pH (3.8) (Hakika *et al.*, 2019). También se han aplicado tratamientos para aguas residuales a través de procesos de oxidación avanzada con ozonificación o métodos foto catalíticos para disminuir el contenido de lignina.

Otro método aplicado al tratamiento de vinaza es la fermentación oscura para la producción de hidrógeno y otros compuestos de interés (Rodríguez Cortés, 2016), con una producción de hasta 61% de hidrógeno, particularmente aplicable a las actividades agroindustriales, por su simplicidad y bajos costos. Los métodos aeróbicos combinados con ozono también son efectivos en la remoción de color (hasta un 25%) y compuestos fenólicos (Ferrer-gutiérrez *et al.*, 2021) pero requieren de una inyección de energía en la aeración.

Por otro lado, los métodos de Oxidación Avanzada (PAO) han demostrado incrementar la producción de metano en un 41.16% cuando se combina con la digestión anaerobia, tal es el caso de la ozonificación (Arimi *et al.*, 2020). Estos presentan un alto potencial en el pretratamiento de influentes recalcitrantes al incrementar la biodegradabilidad (Ferrer-gutiérrez *et al.*, 2021) como en el caso del proceso Foto-Fenton bajo exposición directa a la radiación solar, se reporta que al usarse por al menos 90 minutos en el tratamiento de vinazas se ha registrado una disminución de la DQO de 71,000 mg/L hasta 41,000 mg/L y una disminución de acidez de pH de 4.06 a 7.7 (Rodríguez Cortés, 2016) (con melazas de la caña de azúcar y vinazas de vino).

Si bien, los métodos físicos, electro y bioquímicos han sido exitosos parcialmente, al ser aplicados de forma aislada, en algunos intentos de producir subproductos de interés no se ha logrado una importante producción de bioenergéticos de alta calidad, debido a la formación de compuestos nitrogenados y sulfurados, derivados de los bajos niveles de pH, la alta conductividad de la vinaza y su alta carga orgánica (Arimi *et al.*, 2020). Por otro lado, las vinazas de la producción de mezcal no han sido ampliamente estudiadas, pero hay un abundante campo de investigación en el tratamiento de otros efluentes recalcitrantes como las vinazas de la industria vinícola, azucarera, papelera, del aceite o de la pulpa (Robles-

González, Galíndez-Mayer and Rinderknecht-Seijas, 2012) debido a que representan industrias de mayor tamaño.

3.4 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso de degradación biológico de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, a través de un reactor en el que se digiere la biomasa por medio de bacterias que actúan en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

La biodigestión se llevará a cabo de forma adecuada si se cumplen ciertos parámetros que permitan un ambiente adecuado para que las bacterias se desarrollen, entre estos se encuentran la composición bioquímica de la biomasa (carbohidratos, lípidos y proteínas), la relación Carbono-Nitrógeno (C/N o K), la temperatura, nivel de acidez o alcalinidad (pH), Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV), potencial redox, así como la adición de inhibidores (sustancias tóxicas) o promotores (inoculantes) al proceso.

Al finalizar el TRH del biodigestor se obtendrá un biogás compuesto por metano (55-75%), dióxido de carbono (45-45%) y otros gases; agua tratada y un bio-abono o lodo con nutrientes fijados como posible bio-fertilizante.

Existen diferentes enfoques tecnológicos para el tratamiento de las vinazas, algunos de ellos como la DA han sido exitosos en el tratamiento de la fracción orgánica de las vinazas, se ha reportado que los procesos anaerobios presentan eficiencias de remoción de materia orgánica biodegradable del 70 al 91% en vinazas de diferentes orígenes (Gómez G, 2014) y hasta el 90-95% de la DQO (Tadeu and Loureiro, 2015). Sin embargo, prevalece una fracción importante de compuestos recalcitrantes aún después del tratamiento por DA (como los melanoides, causantes del color), es por esto que se requiere de técnicas auxiliares, primarias o secundarias, así como bióticas y abióticas para el tratamiento integral del residuo (Robles-González, Galíndez-Mayer and Rinderknecht-Seijas, 2012).

P. Soares (Soares-Santos, 2019) encontró que el aprovechamiento de las vinazas requiere investigación en aspectos básicos como el entendimiento del impacto de la variabilidad en la composición y el desempeño de los sistemas anaeróbicos. Sin embargo, la disponibilidad de la materia prima tiene una gran ventaja para la producción de biogás. En sus resultados, la producción de metano no fue afectada por las variaciones en la composición de la biomasa y se concluyó que la vinaza se puede utilizar eficientemente como sustrato para la generación de energía, en condiciones mesofílicas, es decir en un rango de temperatura de 25 a 35 °C.

Uno de los retos principales al tratar con la vinaza es su alto nivel de acidez, en este sentido (García-depraect, Diaz-cruces and León-becerril, 2020) desarrolló un sistema de digestión en dos fases, con fermentación láctica dominante en la acidogénesis, para las vinazas de tequila. Esta nueva e innovadora configuración, mejora el rendimiento del proceso, ya que conduce a una menor pérdida del sustrato en la acidogénesis y es termodinámicamente ventajoso en la metanogénesis, alcanzando un contenido de metano del 83% y eficiencia en la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) cercana al 94%.

Tadeu et al (Tadeu *et al.*, 2017), siguiendo la línea de la digestión en dos fases, obtuvieron una remoción de la DQO mayor al 80% en un reactor ASTBR operando durante 240 días, con bicarbonato como alcalinizador (reduciendo el tiempo de retención del reactor).

En algunos casos (Del Nery *et al.*, 2018) se ha logrado alcanzar un biogás con 68% de metano con otro tipo de vinazas como la de la caña de azúcar, obteniendo buenos resultados para la generación de energía en el caso de la industria azucarera y el etanol.

Ha sido posible remover más de 90 % de su DBO, aunque solo unos 70 % de su DQO (Demanda Química de Oxígeno), pues una parte de la DQO está en forma “dura” (no biodegradable); esta fracción es muy baja cuando la materia prima es jugo de caña, muy alta cuando es melaza, e intermedia cuando se utiliza miel. Sin embargo, se recomienda una neutralización de la vinaza, para un trabajo más efectivo en la producción de biogás, a la par con la ferti-irrigación, con un rendimiento de 8 a 25 m³ de metano por m³ de vinaza.

En este caso la muestra de vinaza fue neutralizada con CaO y un buffer de acetato de sodio regulando el pH a 7 (Terry Calderon, 2019).

Se estima que el potencial energético máximo tan sólo de los residuos sólidos alcanza los 304 GJ/año, mientras que el potencial técnico podría sustituir entre el 42% y 21% de la energía requerida para la etapa de destilación (Manrique *et al.*, 2021). El uso de residuos biomásicos para la sustitución de combustibles fósiles en el proceso de producción del mezcal, es una posible una solución para mitigar impactos ambientales negativos y generar beneficios sociales y económicos, principalmente a los pequeños productores (Manrique *et al.*, 2021).

3.5 Codigestión

La codigestión anaerobia (ACoD, por sus siglas en inglés) es una estrategia de digestión instantánea de dos o más sustratos y cosustratos, su objetivo es favorecer la sinergia y optimizar la producción de metano, seleccionar un cosustrato adecuado y las proporciones de la mezcla es esencial (Siddique and Wahid, 2018). El incremento dramático en publicaciones de ACoD en la última década refleja la viabilidad e idoneidad del proceso de ACoD en el mejoramiento de la producción de biogás, el aumento en el contenido de metano y la sustentabilidad ecológica. La biomasa y las condiciones ambientales pueden ser ajustadas para el diseño universal de biodigestores y la optimización del proceso.

Con un pretratamiento mecánico de reducción de tamaño de partícula, el bagazo muestra un incremento en la producción de biogás (hasta del 13%) al ser sometido a un proceso de digestión anaerobia junto con excreta y vinaza de agave angustifolia (oaxaqueño) (Navarrete-Magaña, 2016).

Por lo expuesto anteriormente es necesario un análisis energético más amplio para ofrecer un mayor entendimiento del potencial y limitaciones del biogás como una fuente de bioenergía proveniente de la vinaza (Tadeu and Loureiro, 2015).

Tadeu y Loureiro enuncian que tan sólo la vinaza proveniente de la industria azucarera tiene un potencial energético de 182.5 MJ por m³ a través de la DA (Tadeu *et al.*, 2017) y al menos del 5 al 15% del consumo de energía global en la industria del etanol podría ser abastecida con dicho potencial. Asimismo, la combinación entre la combustión del bagazo y la DA de la vinaza podrían suplir al menos el 130% de la energía de entrada requerida para las plantas de etanol (Tadeu and Loureiro, 2015), estableciendo que la DA y ACoD deberían ser consideradas como la tecnología central para el tratamiento de vinazas dada la relación de generación de energía/retorno de la inversión.

3.6 Normativa aplicable

Existe un marco regulatorio alrededor de las bebidas destiladas, a través del cual se normalizan diferentes parámetros desde la producción, cultivo y disposición de desechos, a continuación, se enlistan los más relevantes para la elaboración de este trabajo.

3.6.1 Clasificación y denominación de origen

Actualmente, la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016 (DOF - Norma Oficial Mexicana, 2016) “Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones”, correspondiente a la Denominación de Origen Mezcal, extiende la denominación de origen a Oaxaca, Guerrero, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato, Tamaulipas, Michoacán y Puebla.

También clasifica ciertas categorías de mezcal de acuerdo con su proceso de maduración (blanco o joven, madurado, reposado y añejo) y de acuerdo con la maquinaria, el equipamiento, o la infraestructura usada en cada proceso de producción (Martínez *et al.*, 2020) esta clasificación corresponde con mezcal ancestral, mezcal artesanal y mezcal, aumentando la participación de equipos, insumos y materiales industriales más sofisticados, como el acero inoxidable, en cada uno de ellos de acuerdo con la NOM-251-SSA1-2009, (DOF - Norma Oficial Mexicana, 2009).

Por ejemplo, el mezcal ancestral limita el uso de biomasa como combustible en sus procesos, mientras que el mezcal industrializado permite el uso de autoclaves a base de combustibles.

Según la NOM-070, la elaboración de cada uno de los tipos de mezcal debe cumplir con al menos las siguientes cuatro etapas, detalladas a continuación; cocción, molienda, fermentación y destilación.

A través de las NMX se realizan especificaciones fisicoquímicas sobre los límites de alcohol (35 a 55% Vol. Alc. en el caso del mezcal), metanol 30 a 300 mg/100ml de alcohol y otros compuestos químicos como alcoholes superiores, aldehídos, plomo y arsénico y sus técnicas de medición (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Componentes químicos regulados y sus niveles mínimos y máximos permisibles en las NMX. Fuente: (Chavez-Parga, Pérez Hernández and González Hernández, 2016)

Parámetros	Unidades	Mínimo	Máximo	Técnica analítica
Volumen de alcohol a 20 °C	% ABV	35	55	NMX-V-013-NORMEX-2013
Extracto seco	g/L of mezcal	0	10	NMX-V-017-NORMEX-2014
Alcoholes mayores	mg/100 mL de alcohol anhídrido	100	500	NMX-V-013-NORMEX-2013
Metanol	mg/100 mL de alcohol anhídrido	30	300	NMX-V-013-NORMEX-2014
Furfural	mg/100 mL de alcohol anhídrido	0	5	NMX-V-013-NORMEX-2015
Aldehídos	mg/100 mL de alcohol anhídrido	0	40	NMX-V-013-NORMEX-2016
Plomo	mg/L de mezcal	-	0.5	NMX-050-NORMEX-2010
Arsénico	mg/L de mezcal	-	0.5	NMX-050-NORMEX-2011

Cada bebida proveniente de diferentes tipos de maguey y con denominación de origen mexicana, tiene un límite máximo de sustancias permisibles y métodos de medición establecidos.

3.6.2 Límites permisibles en aguas residuales

En cuanto a los desechos generados por la industria mezcalera, se cuenta con parámetros establecidos por la NOM-064-ECOL-1994, (DOF - Norma Oficial Mexicana, 1994) para las aguas residuales provenientes de la destilería (Tabla 3.2).

En el caso de las vinazas, estos niveles son hasta 100 veces mayores a los establecidos en la NOM-064-ECOL-1994 (DOF - Norma Oficial Mexicana, 2021) la única regulación aplicable en México respecto a la descarga de vinazas, que establece los límites máximos de contaminantes en la descarga de aguas residuales en 200 mg O₂/L.

Tabla 3.2 Parámetros establecidos en la NOM-064-ECOL-1994 para la descarga de aguas residuales de la destilería. Fuente: (DOF - Norma Oficial Mexicana, 1994)

PARÁMETROS	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
	PROMEDIO DIARIO	INSTANTÁNEO
pH	6-9	6-9
Demanda Bioquímica de oxígeno (mg/L)	200	240
Demanda química de oxígeno (mg/L)	260	360
Grasas y aceites (mg/L)	10	20
Sólidos sedimentables (ml/L)	1.0	2.0
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	200	240
Fósforo total (mg/L)	5	6
Nitrógeno total (mg/L)	10	12

Si bien la norma establece los límites permisibles de contaminantes, las alternativas de tratamiento no siempre están al alcance (económico y tecnológico) de los productores o no han resultado ser eficaces en la disminución del impacto ambiental (Gallardo, 2019).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Revisión estado del arte

El presente trabajo inició con una revisión del estado del arte acerca del proceso de producción de mezcal y el tratamiento de residuos para de esta forma sustentar las estrategias utilizadas.

Acercamiento a la comunidad

Durante y después de la revisión se realizó un diagnóstico del problema apoyado por el acercamiento a la comunidad de mezcaleros de Tixtla a través de entrevistas semiestructuradas, primero se localizó a las personas clave en la comunidad, mediante la técnica bola de nieve (Rodríguez Contreras, Martínez Rivera and Palomera García, 2017), con el tema que atañe y vincula a los habitantes a través de distintas redes para evitar el sesgo en la mayor medida posible. Posteriormente se estableció una alianza de colaboración con los actores clave como propietarios, encargados y empleados.

Conformación de equipo multidisciplinario

Fue conformado un grupo de trabajo multidisciplinario con el objetivo de recabar las entrevistas, así como el levantamiento de datos del procesamiento de un lote.

Como parte de este grupo de trabajo surgió un subgrupo cuyo objetivo es identificar problemas asociados a los residuos de la producción de mezcal, para su posterior análisis y el planteamiento de una segunda propuesta con soluciones factibles basadas en el uso de tecnologías de energías renovables, que no contravengan razones culturales, artesanales y con la menor afectación al medio ambiente.

Levantamiento técnico de datos

A través de una visita a la mezcalera Amores, se pudo observar el proceso desde la etapa de horneado, con lo cual se cuantificó con ayuda de los maestros mezcaleros, la cantidad de agave, agua, leña y piedra utilizadas por lote y a través de un cálculo teórico con las propiedades físicas y termodinámicas de cada sustancia participe en el proceso, incluyendo las condiciones ambientales de la zona (calor específico, poder calorífico, temperaturas de

ebullición, fusión, ambiente y cocción, humedad y entalpía) con lo cual fue posible establecer el balance de masa y energético por etapa.

Ruta Crítica

Con los datos obtenidos fue posible establecer una ruta crítica del proceso o diagramas de flujo donde se identifican las etapas de generación de residuos, requerimientos de masa y energía, pérdidas, conversión, así como la identificación de puntos críticos de mejora.

Base de datos

Después se conformó una base de datos sobre las características fisicoquímicas del bagazo y vinazas de agaves comunes y utilizados en la destilación de alcoholes como tequila, pulque y mezcal, así como otros residuos de interés mediante distintas fuentes reportadas en la literatura. Con esta recopilación de datos fue posible analizar las características de los residuos y su potencial de aprovechamiento energético para generar una propuesta de autoabastecimiento basadas en fuentes renovables de energía.

Aprovechamiento de residuos y recomendaciones de uso energético

Una vez detectada la cantidad y características de los residuos generados se realizaron diferentes formulaciones para la propuesta de una codigestión de los residuos líquidos a través de un biodigestor.

Estrategias de mejora en eficiencia energética del proceso

Dado el análisis energético del proceso se realizaron recomendaciones de mejora en el proceso a través de estrategias de eficiencia y ahorro energéticos para diferentes etapas de la producción del mezcal.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO

5.1 Diagnóstico del problema: Acercamiento a la comunidad mezcalera de Tixtla, Guerrero

En la comunidad mezcalera de Tixtla se realizaron 10 encuestas a trabajadores, propietarios y miembros de la comunidad por cada mezcalera. La temática de las encuestas se dividió en diferentes áreas entre las que destacan: agua, cultivo, cultura del agave, energía, medio ambiente, proceso y normatividad y residuos. Los resultados más importantes se describen a continuación:

Agua

- El 70% de encuestados afirma que el agua utilizada en los procesos se obtiene de un pozo privado, la cual es de buena calidad según el 30% de encuestados.
- El 50% refiere que el agua pluvial es recolectada para su uso.
- El 100% de encuestados afirma que se cuenta con almacenamiento para el agua.

Cultivo

- El 60% de encuestados indica que el agave utilizado es de especies locales que no requieren cuidados.
- Una de las problemáticas que se identifican es el picudo, una plaga que se presenta de manera esporádica en el maguey.

Tradición y cultura

- El 90% de encuestados afirma que se sienten orgullosos de elaborar mezcal porque es un producto que les gusta, tiene un buen sabor, le da reconocimiento a la comunidad y es un sustento económico.
- La cantidad de trabajadores por mezcalera varía entre 5 a 25 personas, de los cuales se calcula que el 90% son hombres y el 100% son trabajadores locales de Tixtla.

Energía

- El 100% de encuestados paga su factura eléctrica, refieren que el combustible principal que se utiliza es la leña, seguido de la gasolina

- El 60% de los encuestados afirma conocer algunos beneficios de las energías renovables tales como el ahorro de energía en el consumo eléctrico y como abastecimiento para bombas de agua.
- El 100% de los encuestados afirma tener espacio para la instalación de nuevos equipos.

Medio ambiente

- El 40% de los encuestados afirma que el traslado de los recursos al palenque se realiza en camioneta o caballo y lo califica como “no muy disponible” respecto a la ubicación y acceso.
- El 20% considera que existe un impacto ambiental importante en el proceso de producción, otro 20% considera que, si es sustentable, pero se identifican problemáticas como el humo de la combustión y algunos (10%) reportan ya estar trabajando en vías de la sustentabilidad.

Proceso y normativa

- El 30% de los encuestados afirma que no es necesario agregar levaduras ya que son formadas en el mismo proceso
- La forma de determinar las cantidades de materia prima es subjetiva
- Los combustibles utilizados que se mencionan son la gasolina para el molino, gas y/o leña para la cocción.
- El 90% de los encuestados afirma no basar su proceso en ninguna normativa o metodología de manual.
- De manera general se refieren a un horno cónico de entre 1.5 y 2.5m de profundidad para la cocción del maguey.
- Se menciona el uso de un alcoholímetro como único método de medición (40%) y al menos el 40% desearía poder medir otros parámetros de interés.

Residuos

- Al menos el 60% afirma que los residuos tienen un uso, en su mayoría como abono para las tierras.
- Algunos residuos reportados van (de mayor a menor cantidad) desde el bagazo, ceniza, vinaza y cobre, el 20% desconoce el tipo de residuo que se genera.
- El 80% afirma que los residuos se utilizan como abono para las tierras de cultivo y que no se cuenta con ningún sistema de tratamiento de sólidos o líquidos (100%).

5.2 Levantamiento técnico de datos de la producción de mezcal y ruta crítica

El proceso seguido en el palenque de Amores para la producción de mezcal se describe a continuación.

Un lote está conformado por los corazones de agave, es decir, el agave labrado, que es pesado y almacenado hasta completar el lote que irá al horno de cocción, que consta de 20 ton de piña cruda. Para el horno de cocción se apilan rocas en forma de cono, se coloca leña en el centro y se enciende con ayuda de las cabezas (Figura 5.1).



Figura 5.1 Apilamiento de rocas, leña y cabezas en el horno.

Una vez que se han calentado las piedras y el horno durante 7hrs aproximadamente, se hace una nueva cama de rocas sobre la ceniza y se acomodan las piñas en el horno, finalmente se cubren con petates o bagazo y arcilla para obstruir la entrada del oxígeno y mantener la cocción durante 7 días (Figura 5.2).



Figura 5.2 Cocción de las piñas con horno cerrado.

Una vez que las piñas se han cocido se retira la cubierta, se extraen, se pesan y se almacenan para ser desfibradas. En la siguiente etapa pasan a un proceso de trituración (mediante una trituradora de gasolina) y posteriormente a la tina de fermentación (Figura 5.3).



Figura 5.3. Preparación de piñas cocidas para la fermentación.

En la fermentación se mezcla el agave triturado y agua a 35 °C en una relación de 5:3 y se fermenta durante 2 días, sin la adición de ningún promotor o levadura), luego se agregan 3 partes más de agua y se sigue fermentando durante 4 días, al día 5 se tapa la tina como un control de temperatura (Figura 5.4).



Figura 5.4. Proceso de fermentación de las piñas.

El proceso continua con la primera destilación, donde se obtiene el “ordinario” una mezcla con un 12% a 30% v de alcohol, en esta operación se enciende la leña para el calentamiento y se llena el alambique con el fermentado en 60 lotes. El destilado se obtiene 9 horas después de iniciado el calentamiento y después de 7 horas se obtienen 75 litros de ordinario o primer destilado junto con 425kg de bagazo y vinazas por lote (en un 25% y 75% respectivamente) como primeros residuos del proceso.

La segunda destilación se conoce como refinado y es la etapa siguiente del proceso. La cual se lleva a cabo una vez que se obtuvo todo el ordinario del lote de cocido. La actividad comienza con el vertido del ordinario almacenado al alambique hasta llenar 2/3 de su volumen total con el fin de evitar que la ebullición arrastre producto no destilado. Se prende la madera para que se caliente el alambique (Figura 5.5), en esta actividad utilizan las cabezas de agave como iniciador de fuego y se vierten a la leña. El calentamiento dura 2 horas antes de obtener el destilado. Se obtiene un primer destilado llamado cabezas que son los productos más volátiles.

Después se recolecta el cuerpo o corazón durante 14 horas, recuperando 140 litros. Finalmente se recolectan las colas por un periodo de 90 min recuperando 15 litros. Tanto las cabezas como las colas se consideran un residuo del proceso. Una vez concluida la destilación se obtienen más de 2,310kg de residuos en forma de vinazas que se extraen del alambique.



Figura 5.5 Equipo de destilación del fermentado.

La última etapa del proceso que se realiza en el palenque es el ajuste de grado alcohólico agregando agua purificada al destilado llamado “cuerpo” hasta ajustarlo a 50% v/v para cumplir con el estándar de comercialización. Finalmente, el mezcal obtenido se almacena hasta su venta.

5.3 Descripción del proceso (balance de masa)

Se realizó la ruta crítica del proceso por operación unitaria: horneado, triturado, fermentado, primer destilado y segundo destilado, en términos del balance de masa de entrada (m_{in}) y de salida (m_{out}) del proceso.

En el proceso de horneado se obtienen 5,300 kg de jugo que corresponden a los vapores condensados durante la cocción, por lo que se calcula que a la etapa de triturado entran sólo 14,000 kg de piña cocida, que sale de esta etapa en forma de fibra y miel.

El fermentado se realiza añadiendo 16,800 kg o litros de agua a la piña cocida y triturada, del cual, 700 kg se evaporan y gasifican, por lo que en conjunto se generan 6,000 kg de vapor o jugo sobrecalentado.

Durante la primera destilación los más de 30,100 kg se convierten en 26,180 kg de residuos, que en conjunto con los 2,310 kg provenientes de la segunda destilación, forman: 21,945 kg de vinaza, 6,545 kg de bagazo, 38.5 kg de cabezas y 231 kg de colas.

Finalmente, del segundo destilado de 4,620 kg de ordinario, se obtienen 2,040.5 kg ó 2,245.8 litros de mezcal.

5.4 Descripción del proceso (balance energético)

El proceso de obtención del mezcal ya descrito requiere de diferentes fuentes de energía, en este caso, de gasolina para accionar el molino en la etapa de trituración (2) y de leña para la cocción de las piñas (1), el calentamiento de agua durante la fermentación (3) y las destilaciones del fermento (4 y 5).

Para realizar la ruta crítica en términos de la energía que entra (E_{in}) y la energía que sale (E_{out}) se tomaron en cuenta los parámetros enlistados en la Tabla 5.1 para la materia prima y combustibles utilizados (leña, agua y piedra) y las condiciones ambientales del lugar (temperatura promedio y humedad).

Tabla 5.1 Parámetros del cálculo energético. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros del cálculo energético	Cantidad	Unidades
Pc_Encino^1	18,689,928	J/kg
Cp_agua^2	4.1813	kJ/kgK
T_amb^3	22.7	°C
$Cp_basalto^4$	1.04	kJ/kgK
$Tf_basalto^5$	600	°C
Hv_agua^6	2257	kJ/kg
Hv_etanol^7	854	kJ/kg
Teb_etanol^8	78.37	°C
$Hleña^9$	71	%
$Hv_metanol$	1129	kJ/kg

1. (Agostinho-Da Silva *et al.*, 2014), 2. (Cengel and Boles, 2012), 3.(CONAGUA, 2022), 4. (Cuentas Alvarado, 2020), 5. (Lutgens, Frederick K., Tarbuck, 2000), 6. (Cengel and Boles, 2012), 7.(Cengel and Boles, 2012), 8. (Cengel and Boles, 2012), 9.(NASA, 2022), .

En el caso del horneado, se tomó en cuenta la energía requerida para cocer la piña (la cual se considera cocida por arriba de los 78 °C hasta los 90 °C) y para calentar la piedra antes de su temperatura de fusión.

Por lo tanto, la energía de entrada a la etapa de horneado (E_{in1}), se calcula con la ec. 1:

$$E_{in1} = m_L * P_{C_{encino}} \quad [J] \quad (1)$$

Donde la masa de la leña (m_L) equivale a 20,000 kg.

La energía útil ($E_{útil1}$), (ec. 2) es la suma de la energía requerida para cocer las piñas hasta los 90 °C ($E_{piñas}$) y para generar vapor que se condensará en el horno en forma de jugo (E_{vapor}), la energía requerida para calentar las piedras de basalto ($E_{piedras}$) y la energía necesaria para retirar la humedad de la leña ($E_{leña}$).

$$E_{útil1} = E_{piñas} + E_{vapor} + E_{piedras} + E_{leña} \quad [J] \quad (2)$$

Donde

$$E_{piñas} = m_L * C_{p_{agua}} * (T_{cocción} - T_{amb}) \quad [J] \quad (3)$$

$$E_{vapor} = m_{leña} * h_{agua} * H_{leña} \quad [J] \quad (4)$$

$$E_{piedras} = m_{piedra} * C_{p_{piedra}} * (T_{fusión} - T_{amb}) \quad [J] \quad (5)$$

$$E_{leña} = h_{vapor} * m_{vapor} \quad [J] \quad (6)$$

Por lo tanto, la energía pérdida en esta etapa (E_{p1}) es igual a:

$$E_{p1} = E_{in1} - E_{útil1} \quad [J] \quad (7)$$

En el caso del triturado se considera que se utiliza un motor de gasolina de 8 HP a 4 tiempos, se estima que por cada lote se utilizan dos litros de gasolina, cuyo poder calorífico es de 33 kJ/m³ (DOF, 2010) por lo que la energía utilizada en el proceso de triturado se calcula a través de la ec. 7:

$$E_{in2} = 2P_{c_{gasolina}} * no. lotes \quad [J] \quad (8)$$

Durante el fermentado, se quiere de 16,800 litros de agua calentada a una $T_{ferm} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ con leña, considerando una eficiencia térmica promedio de la leña (n_T) en un fogón tradicional del 10% (Aristizábal Hernández, 2014) con la ec.9 se calcula la cantidad de energía utilizada en este proceso, ya que se desconoce la cantidad de leña recolectada para esta etapa.

$$E_{in3} = n_T * (E_{\acute{u}til3} + E_{p\acute{e}rda3}) \quad [J] \quad (9)$$

En este caso, la energía utilizada para calentar el agua está dada por la ec.10

$$E_{\acute{u}til3} = m_L * Cp_{agua} * (T_{ferm} - T_{amb}) \quad [J] \quad (10)$$

Y la energía perdida (E_{p3}) se calcula con la ecuación 7 y los resultados de la etapa 3.

Durante el destilado el fermento debe calentarse a una temperatura de destilación $T_{1dest} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ suficiente para evaporar el etanol sin alcanzar la temperatura de evaporación del agua en este caso con 18,060 kg de leña (en 60 lotes de 300 kg), la energía de entrada (E_{in4}) se calcula con la (Ec. 1).

La energía útil ($E_{\acute{u}til4}$) en este proceso se conforma por la energía necesaria para calentar los 30,100 kg de fermento (E_{ferm}) considerando el Cp_{agua} , junto con la energía para evaporar el etanol $E_{(etanol)}$ del cual se tiene un 30% de contenido en volumen, y la energía para evaporar el agua.

$$E_{\acute{u}til4} = E_{ferm} + E_{etanol} + E_{agua} \quad [J] \quad (11)$$

$$E_{ferm} = m_L * Cp_{agua} * (T_{1dest} - T_{amb}) \quad [J] \quad (12)$$

$$E_{etanol} = m_{etanol} * Hv_{etanol} \quad [J] \quad (13)$$

$$E_{agua} = m_{agua} * Hv_{agua} \quad [J] \quad (14)$$

Por lo que la energía perdida (E_{p4}) se calcula con la ec. 7 y los resultados de la etapa 4.

Durante el segundo destilado, se pretende remover del mosto la presencia de otros compuestos como el metanol y elevar el grado de pureza del mezcal con un mayor grado

de etanol. El ordinario en esta etapa está conformado por 16 lotes de 288 kg de los cuales 2.42 kg son cabezas, 14.4 kg colas, 127.2 kg cuerpo y 143.98 kg de vinazas.

El mosto se somete a calentamiento a una temperatura de segunda destilación de $T_{2dest} = 80$ °C para lo cual se agregan 300 kg de leña por lote, por lo que la energía de entrada (E_{in5}) se calcula con la ec. 1.

La energía útil de esta etapa del proceso ($E_{útil5}$) se calcula tomando en cuenta la energía de calentamiento del agua (E_{agua}), la energía de evaporación del metanol ($E_{metanol}$) y etanol (E_{etanol}), así como la energía necesaria para la evaporación del contenido de las colas (E_{colas}).

$$E_{útil5} = E_{agua} + E_{etanol} + E_{metanol} + E_{evap} \quad [J] \quad (15)$$

$$E_{agua} = m_L * Cp_{agua} * (T_{2dest} - T_{amb}) \quad [J] \quad (16)$$

$$E_{metanol} = m_{metanol} * hv_{metanol} \quad [J] \quad (17)$$

$$E_{etanol} = m_{etanol} * hv_{etanol} \quad [J] \quad (18)$$

$$E_{colas} = m_{agua} * hv_{agua} \quad [J] \quad (19)$$

La energía perdida (E_{p5}) se calcula con la ecuación 7 y los resultados de la etapa 5.

Finalmente la energía de todo el proceso (E_{in}), ($E_{útil}$) y ($E_{perdida}$) se calcula a través de las ecuaciones 20-22

$$E_{in} = E_{in1} + E_{in2} + E_{in3} + E_{in4} + E_{in5} \quad [J] \quad (20)$$

$$E_{útil} = E_{útil1} + E_{útil2} + E_{útil3} + E_{útil4} + E_{útil5} \quad [J] \quad (21)$$

$$E_{perdida} = E_{p1} + E_{p2} + E_{p3} + E_{p4} + E_{p5} \quad [J] \quad (22)$$

5.5 Banco de datos de bagazo y vinaza

Las características fisicoquímicas de los residuos fueron consultadas en la bibliografía con el fin de conocer el tipo de residuo y posible tratamiento para la obtención de subproductos.

Se clasificaron en distintas categorías para conformar un banco de datos como se muestra a continuación.

Relación C/N (K)

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación para las bacterias metanogénicas encargadas de la formación de metano en la biodigestión, por lo que la razón de concentraciones C/N tiene una gran importancia en el proceso fermentativo.

Por un lado, el carbono constituye la fuente de energía y es consumido 30 veces más que el nitrógeno cuya función es la formación de nuevas células. Por lo que la relación óptima de C/N recomendada va desde 20:1 hasta 30:1, es decir, de 20 a 30 unidades de carbono por una de nitrógeno (FAO, 2011). Si la relación es superior a 35:1 la multiplicación de bacterias será baja y la descomposición ocurrirá de manera lenta debido a la falta de nitrógeno además de desacelerar la humificación del proceso. Si la relación es menor de 8:1 se formará amonio en exceso lo que inhibirá el proceso y añadirá toxicidad a la mezcla (AGENEX, 2008). En formulaciones que contienen diversas materias primas, esta relación se puede calcular a través de la ecuación (3.3) (FAO, 2011):

$$K = \frac{C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2 + \dots + C_n * Q_n}{N_1 * Q_1 + N_2 * Q_2 + \dots + N_n * Q_n} \quad (23)$$

Donde:

K= Relación C/N de la mezcla de materias primas

C = % de carbono orgánico en la materia prima

N= % de nitrógeno orgánico en la materia prima

Q= Peso fresco de cada materia (kg)

Algunas especies animales y vegetales tienen una relación K mayor o menor a la óptima, por lo que es necesario utilizar diferentes combinaciones para alcanzar una proporción óptima entre estos elementos (de 20 a 30 unidades de carbono por una de nitrógeno).

En la Tabla 5. 2 se condensan los valores de K reportados para diferentes tipos de biomasa (Tabla A1, Anexo 1), entre ellos los residuos de la elaboración del mezcal (vinaza y bagazo) y otros ampliamente utilizados en biodigestores en operación a nivel mundial, como la excreta de ganado y residuos de hortalizas.

Tabla 5.2 – Relación C/N diferentes biomosas.

Relación C/N	%C	%N	Relación C/N
Vinaza de tequila ¹	28.80	0.55	50:1
Vinaza de mezcal ²	29.00	0.54	52:1
Bagazo de agave (tequila, tequilana) ³	50.60	0.53	95.5:1
Bagazo de agave (mezcal, angustifolia) ⁴	87.00	1.00	116:1
Residuos hortalizas ⁵	30.00	1.80	17:1
Excreta bovinos ⁶	30.00	1.30	25:1
Excreta porcinos ⁷	25.00	1.50	16:1
Excretas humanas ⁸	2.50	0.85	3:1

1. (León *et al.*, 2020), 2. (Terry Calderon, 2019), 3. (González García, González Reynoso and Nungaray Arellano, 2005), 4. (Gómez G, 2014), 5-6. (FAO, 2011), 7-8. (Rodríguez, 2015).

En la Tabla 5.3 se muestra la caracterización de un posible inóculo proveniente de un biodigestor en operación, que en conjunto con los residuos formará distintos escenarios de codigestión.

Tabla 5.3 – Caracterización del inóculo. Fuente (Terry Calderon, 2019).

Componentes	Valor
Carbono (%C)	35.4
Nitrógeno (%N)	1.86
Humedad (%H)	17.4
Relación C/N (K)	19

Sólidos totales (ST)

El porcentaje de ST permite conocer el uso potencial de los residuos orgánicos en la producción de biogás (Mojica, 2016). La fracción de sólidos en la mezcla es un factor importante ya que la movilidad y acción de las bacterias metanogénicas se verá afectada por un aumento en el contenido de sólidos y por lo tanto se alterará la eficiencia del sistema.

Valores experimentales (Venegas-Venegas J., 2015) demuestran que la carga de sólidos totales se debe encontrar entre el 8 y 12% para biodigestores continuos y semicontinuos (Martínez, 2007) y entre 40% y 60% para biodigestores discontinuos.

La mayoría de los residuos por sí solos no cumplen con el porcentaje de sólidos requerido, para cumplir con este requerimiento deben ser mezclados con agua en proporciones definidas de acuerdo con el porcentaje de sólidos inicial.

A través de la ec. 24 se puede calcular la cantidad de agua (litros de agua por kg de excreta) que se necesita agregar para diluir la mezcla y obtener la proporción adecuada de ST (FAO, 2011).

$$W_{agua} = \frac{\frac{\% S.T \text{ residuo fresco}}{100} - \frac{\% S.T \text{ deseado}}{100}}{\frac{\% S.T \text{ deseado}}{100}} \left[\frac{l \text{ agua}}{kg \text{ excreta}} \right] \quad (24)$$

La cantidad de agua debe ser calculada para cada una de las materias primas, por lo que el volumen total de agua (V_{agua}) está dado por la ecuación 26:

$$V_{agua} = W_{agua_1} + W_{agua_1} + \dots + W_{agua_n} \quad [l] \quad (25)$$

$$V_{agua} = \sum_{l=1}^n W_{agua_n} \quad [l] \quad (26)$$

Los datos de ST, pH y DQO reportados en la literatura en el caso de las vinazas se condensan en la Tabla 5.4, para consultar información sobre más residuos, ver Anexo 1, Tabla A2.

Tabla 5.4 – Características de diferentes tipos de vinaza (sólidos totales, pH y DQO).

Tipo de vinaza	ST (mg/L)	pH (3.68)	DQO (mg/L)
Vinaza de agave cocui ¹	0.75	3.68	17,960
Vinaza de mezcal ²	2.68	3.70	56,230
	4.35	3.60	60,560
	9.47	3.80	122,860
Vinaza de melaza de azúcar ³	6.30	3.80	59,000
Vinaza de mezcal ⁴	4.59	3.44	26,050
	4.27	3.50	27,850
	4.51	3.60	29,000
	4.29	4.42	17,600
Vinaza de mezcal ⁵	4.90	4.77	59,000

1. (León *et al.*, 2020), 2. (Robles-González, Galíndez-Mayer and Rinderknecht-Seijas, 2012), 3. (Robles-González, Galíndez-Mayer and Rinderknecht-Seijas, 2012), 4. (Terry Calderon, 2019), 5. (López Velarde Santos *et al.*, 2019).

Asimismo, se muestran las características del bagazo de diferentes tipos de agave (Tabla 5.5), desde agave tequilero (tequilana), pulquero (salmiana) y mezcalero (angustifolia).

Tabla 5.5 – Características de diferentes tipos de bagazo.

BAGAZO	Agave tequilana ¹	Agave salmiana ²	Agave angustifolia ³
	(%)	(%)	(%)
Compuesto	43	41-47	41.9
Celulosa	19	13-14	12
Hemicelulosa	15	9 a 10	7.2
Carbohidratos solubles totales	5	-	-

1. (Davis, Dohleman and Long, 2011), 2. (Navarrete-Magaña, 2016), 3. (Gómez G, 2014).

Finalmente se recopilaron datos del potencial de producción de biogás de distintos residuos de interés como se muestra en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Producción de biogás de diferentes especies.

Biomasa	Producción de biogás diaria (m ³ /kg)
Vinaza ¹	0.005
Hortalizas ²	0.35
Inoculo ³	0.07
Porcino ⁴	0.07
Humano Adulto ⁵	0.07

1. (López Velarde Santos *et al.*, 2019), 2. (FAO, 2011), 3. (Terry Calderon, 2019), 4,5. (Ashraf, 2016).

En el Anexo 1, Tabla A3 se encuentran enlistados otros tipos de residuos y su valor de producción de biogás.

5.6 Propuesta de uso de residuos líquidos (vinaza)

Se realizaron diferentes escenarios de codigestión para la vinaza y bagazo de agave, de los cuales finalmente se propusieron 3 escenarios de análisis con vinaza al 45% (Tabla 5.7), 20% (Tabla 5.8) y 5% (Tabla 5.9), normalizado para 1 kg de residuos en mezcla.

Tabla 5.7 Propuesta de codigestión con vinaza al 45%.

Propuesta 1	
Porcentaje en masa	Biomasa
45%	Vinaza
5%	Bagazo
50%	Porcino

Tabla 5.8 Propuesta de codigestión con vinaza al 20%.

Propuesta 2	
Porcentaje en masa	Biomasa
20%	Vinaza
40%	Hortalizas
10%	Inoculo estabilizado
30%	Porcinos

Tabla 5.9 Propuesta de codigestión con vinaza al 5%.

Propuesta 3	
Porcentaje en masa	Biomasa
5%	Vinaza
45%	Bagazo
50%	Excreta humana

Con la información obtenida en la sección 5.5 se calculó la relación C/N y el balance de sólidos totales con el fin de analizar las ventajas y desventajas de cada propuesta para su uso en un biodigestor.

Posteriormente se calcularon algunos parámetros de dimensionamiento para un digestor de la propuesta que se consideró más adecuada.

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

El tiempo de retención depende de la temperatura promedio de lugar y se puede calcular a través de la siguiente relación (ec.27), (Urra-Balcazar, 2009):

$$TRH = - 51.227 * \ln(T) + 206.72 \quad [días] \quad (27)$$

Donde T(°C) es la temperatura de operación o temperatura promedio del lugar de instalación. Se aprecia que entre mayor sea la temperatura del lugar, el tiempo de retención será menor y por lo tanto el volumen que ocupa la biomasa. Se estima que el biogás producido a través de la conversión de sólidos totales comienza desde los 10 días del TRH.

Volumen del biogás producido

El volumen de biogás que será producido diariamente es igual a la suma del producto de la producción de biogás (P_b) por kg de residuo por la cantidad de residuo disponible (E_d), en el caso de los residuos animales, o su equivalente en residuos vegetales (Martínez, 2007), ecuación 29:

$$V_B = (P_{B1} * E_{d1}) + (P_{B2} * E_{d2}) + \dots + (P_{Bn} * E_{dn}) \quad [m^3] \quad (28)$$

$$V_B = \sum_{i=1}^n (P_{Bn} * E_{dn}) \quad (29)$$

Volumen del biodigestor

El volumen del biodigestor se calcula con la ecuación 30 (Martínez, 2007):

$$V_{TOTAL} = 1 \frac{1}{3} * (V_{agua} + V_{Tmasa}) \quad [m^3] \quad (30)$$

Volumen de laguna de secado

La laguna de secado corresponde al lugar donde se recuperará el efluente, el cual equivale aproximadamente al 85-90% del influente (ProfEC, 2010) por lo cual las dimensiones de este tanque se pueden estimar con la ecuación 31:

$$V_{Sec} = V_{Tmasa} * 0.9 \quad [m^3] \quad (31)$$

Finalmente considerando la energía de entrada al proceso como se calculó en la sección 5.4, se calculó el potencial de abastecimiento de energía del biodigestor (E_{vinaza}) como combustible en sustitución de la leña, considerando un poder calorífico del biogás de $P_{C_{biogás}}=7$ kWh/m₃ (FAO, 2011) con una caldera del 90% de eficiencia y una producción óptima a partir del día 10 del TRH.

$$E_{vinaza} = V_B ** 3600 * 0.9 * 30 \quad [J] \quad (32)$$

5.7 Recomendaciones de mejora en la eficiencia energética del proceso.

Residuos sólidos

En el caso del bagazo se propone la elaboración de briquetas con secado solar o prensado, para lo cual se considera un poder calorífico del bagazo $P_c = 16.96$ MJ/kg (Aristizábal Hernández, 2014).

Se estima que el P_c del bagazo aumenta hasta en un 15% cuando se combina con materiales como carbón activado o se utiliza en briquetas (Madlala, Eloka-eboka and Lokhat, 2021), mientras que la densidad energética aumenta hasta en un 63% en combinación con otros residuos orgánicos como cáscaras de frutos secos o semillas.

Para la realización de las briquetas se requiere un contenido de humedad del 10-12% del residuo, mientras que el bagazo tiene una humedad hasta del 80% (Danilo *et al.*, 2017) por lo que se propone el uso del prensado y del secado solar para extraer la humedad de las briquetas (E_{evap}).

Se calculó el potencial energético del uso de briquetas de bagazo de agave (E_{bagazo}) tomando en cuenta dichas consideraciones, con la ecuación 33.

$$E_{bagazo} = (P_c * 0.15 * m_{bagazo} * 0.4) - E_{evap} \quad [J] \quad (33)$$

Durante el análisis del proceso de elaboración del mezcal, se detectaron otras áreas de oportunidad, que en combinación con el uso energético de residuos potenciarán el ahorro y uso eficiente de la energía del proceso. Por ejemplo, el uso de un intercambiador de calor, el precalentamiento del agua en el fermentado mediante la implementación de un calentador o estufa eficiente, la sustitución de piedras durante la cocción y la sustitución del motor de gasolina por uno eléctrico.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Diagnóstico del problema: Acercamiento a la comunidad mezcalera de Tixtla, Guerrero

Los resultados de las encuestas realizadas fueron clasificados en 3 áreas de interés:

1. Problemáticas detectadas en la mezcalería

En este rubro se encontró que los entrevistados consideran que no se cuenta con sistemas de tratamiento o se desconoce el tratamiento adecuado para los residuos generados. Sólo un 20% identifican los residuos del proceso como: vinaza, bagazo, piñas, ceniza y cobre, este último resultante de los equipos de destilación.

Como se aprecia en la Figura 6.1 otra de las problemáticas más importantes es la aparición de algunas plagas como el “picudo”, seguido de la dificultad de acceso y traslado de los recursos al palenque y la falta de medición de parámetros de interés durante el proceso.

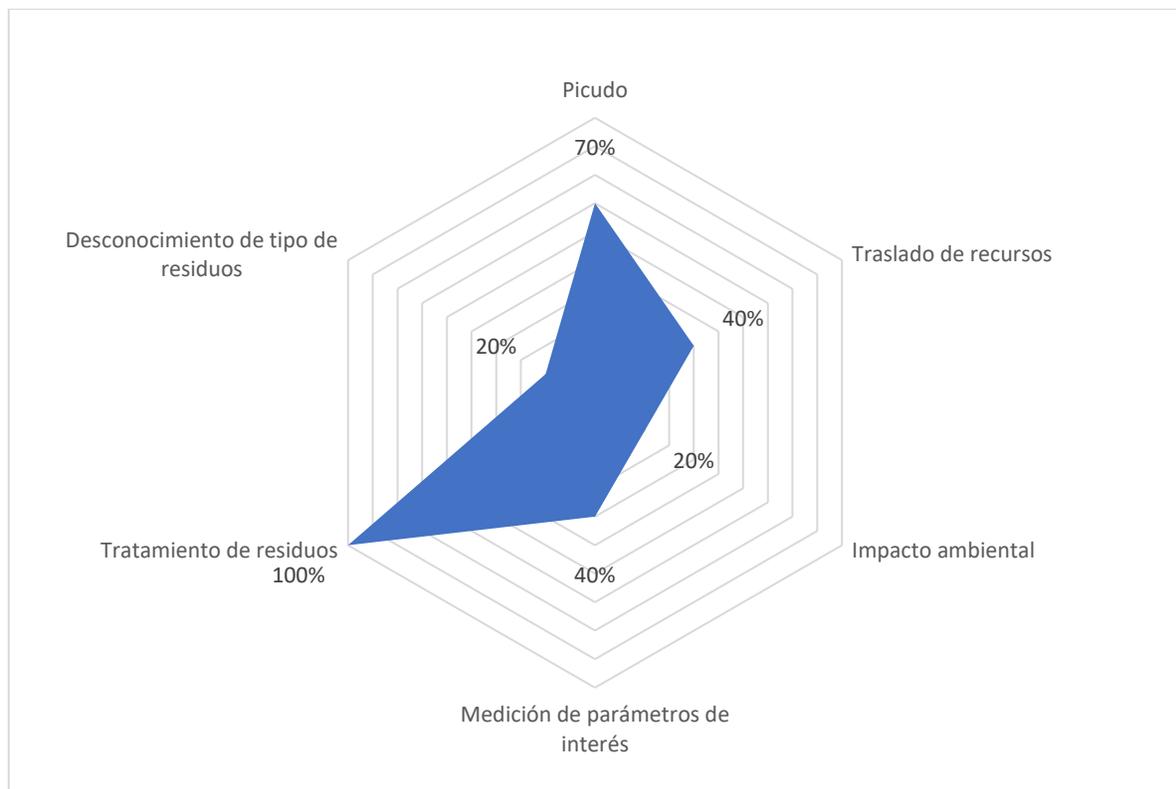


Figura 6.1 Percepción de las problemáticas detectadas en la mezcalería.

2. La mezcalería en la comunidad

En el segundo rubro, de acuerdo con las respuestas obtenidas, se identificó que al menos el 50% de los encuestados refiere que el sabor del mezcal y la distinción de su sabor por encima de otros es lo que brinda el mayor orgullo para ellos. La comunidad está al tanto de la distinción cultural que brinda el mezcal a la localidad y su importancia en la generación de empleos (Figura 6.2).

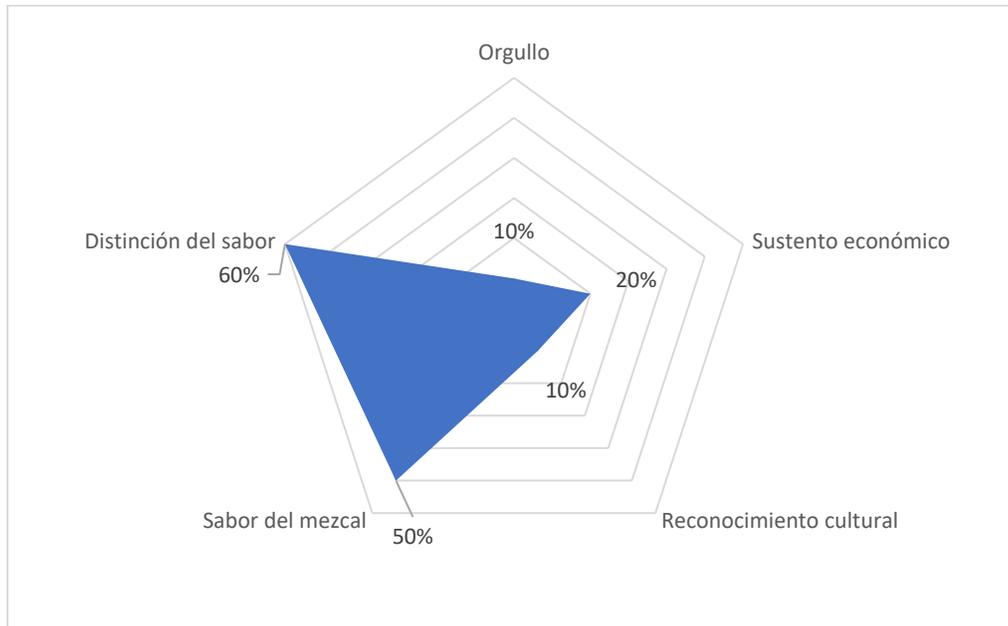


Figura 6.2. Percepción de la mezcalería en la comunidad.

3. Energías renovables en la mezcalería

Finalmente, en cuanto a sustentabilidad y energía, el 100% de encuestados afirma que se cuenta con espacio disponible propio de las mezcaleras para la instalación de nuevos equipos, además de que al menos el 60% conoce algunos beneficios de las energías renovables como el ahorro energético y el 10% se encuentra trabajando en alternativas energéticas para el autoabastecimiento como son sistemas fotovoltaicos (Figura 6.3).

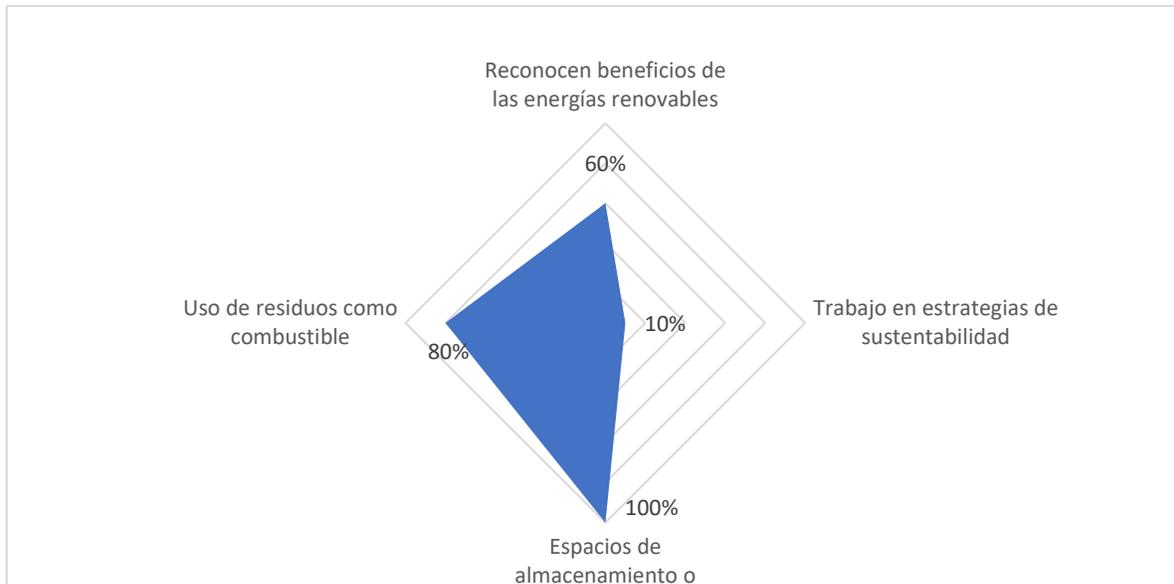


Figura 6.3 Percepción de las energías renovables en la comunidad.

El 80% afirma que los residuos podrían ser utilizados como combustible sin embargo hasta ahora los esfuerzos no han resultado en un uso eficiente.

6.2 Descripción del proceso (balance de masa)

El flujo de masa durante el proceso se estimó de acuerdo con lo presentado en la sección 5.3 y se muestra en la Figura 6.4 para cada etapa del proceso.

La masa de entrada al sistema está conformada por 20 toneladas de piña y 16.8 toneladas de agua, de las cuales se producen 28,490 ton de bagazo y vinaza, lo que representa un 17.79% y 59% de la masa de entrada respectivamente (Figura 6.5).

Adicionalmente se liberan aproximadamente 6 toneladas de jugos, esto es el vapor resultante de los procesos de fermentado y destilación, junto con 231 kg de colas y 38 kg de cabezas los cuales son residuos no aprovechables actualmente.

En la figura 6.4 se aprecia que los residuos constituyen el 94.45% de la masa de salida del proceso.



Figura 6.4 Diagrama de flujo de la obtención de mezcal en términos de masa.



Figura 6.5 Diagrama de sankey del flujo de masa durante el proceso de obtención del mezcal.

6.3 Descripción del proceso (balance energético)

Como se describió en la sección 5.4 se calcularon los flujos de energía durante el proceso, tomando en cuenta la energía generada por la combustión de la leña y gasolina, los resultados obtenidos se ilustran en la Figura 6.6.

Horneado

Se estima que durante el horneado de la energía generada por los 3,000 kg de leña sólo se aprovecha como energía útil el 47%, dando como resultado la etapa de mayor eficiencia térmica, esto considerando que sólo el 21% de la energía útil se utiliza para la cocción del maguey, el 18.2% para la evaporación de humedad de la leña, el 9.1% para el calentamiento de las piedras y el resto (51%) para la evaporación de los jugos. La energía útil y la energía perdida (53%) en este proceso se ilustra en la Figura 6.7.

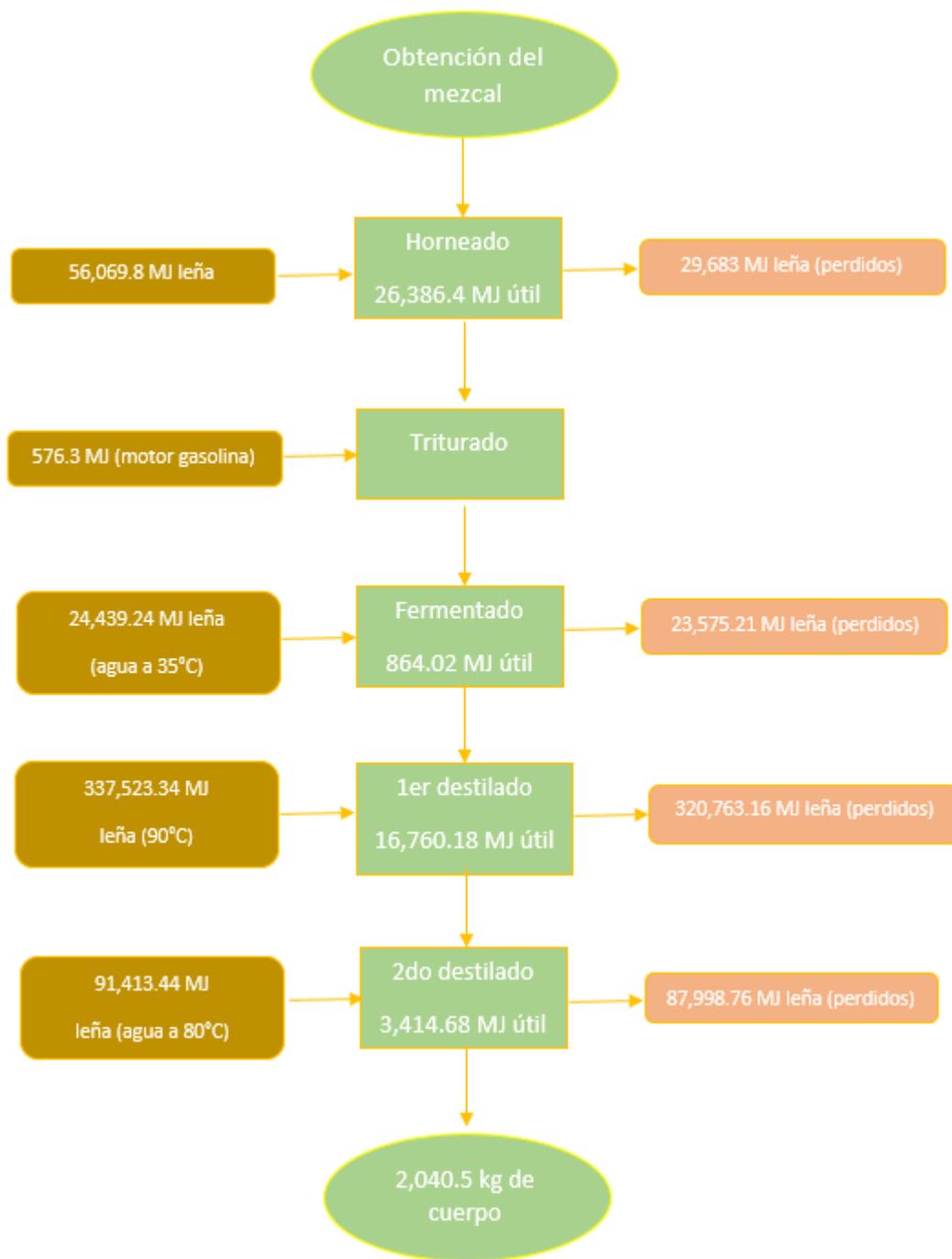


Figura 6.6. Diagrama de flujo de energía en la obtención de mezcal.

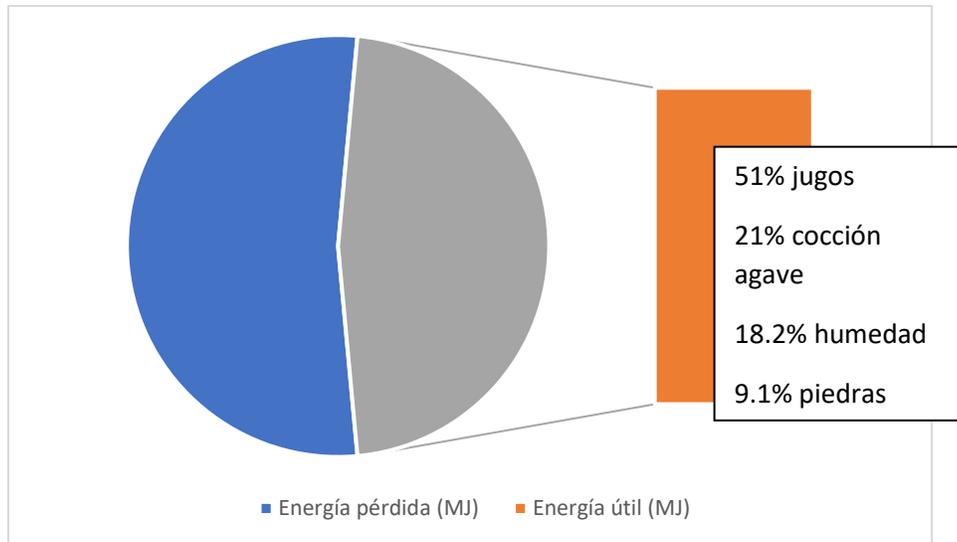


Figura 6.7 Distribución de la energía en el horneado

Fermentado

Durante el fermentado, considerando la energía utilizada para el calentamiento del agua a través de un fogón de leña tradicional, se estima que la energía útil del proceso corresponde a 864 MJ lo que representa sólo el 3.66% de la E_{in2} , ya que el resto de energía se disipa al medio ambiente y en forma de vapor (Figura 6.8). Esta parte del proceso se considera la menos eficiente, ya que se cuenta sólo con un fogón de leña para el calentamiento del agua.

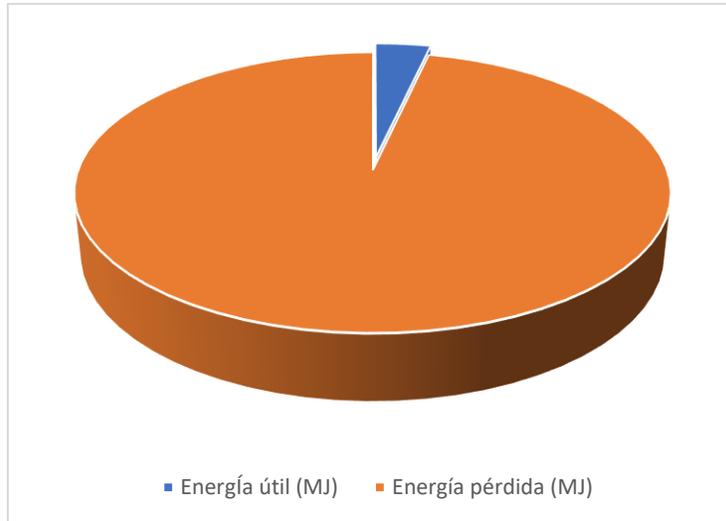


Figura 6.8 Distribución de la energía en el fermentado.

Primer destilado

En el primer destilado del fermento de agave, se requiere de 16,760 MJ de energía térmica para el calentamiento hasta los 90 °C y la evaporación del agua. Por lo cual de los 337,23.34 MJ de entrada, sólo se aprovecha el 4.97%, mientras que el más de 95% corresponde a las pérdidas debidas a la combustión de la leña y el aislamiento del alambique (Figura 6.9).

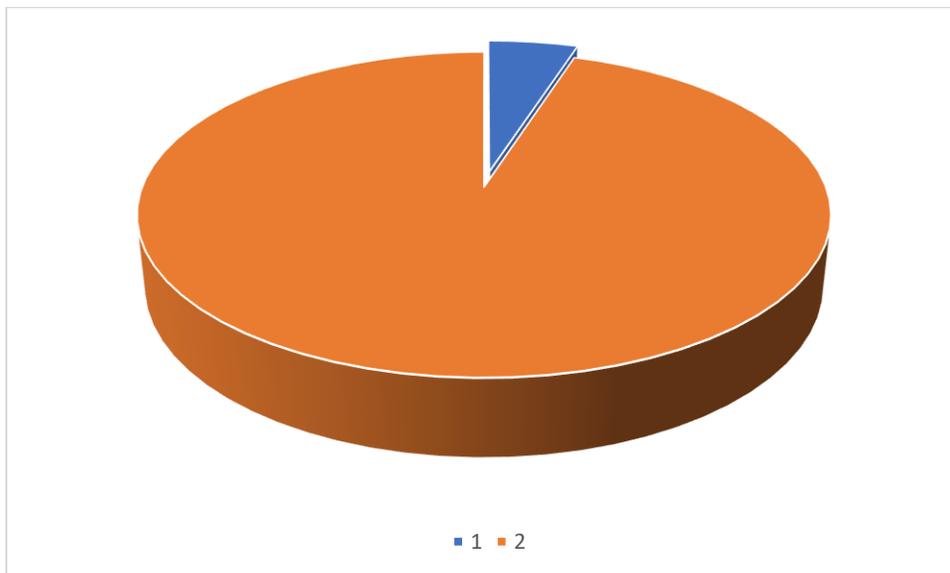


Figura 6.9 Distribución de la energía en el primer destilado.

Segundo destilado

En la segunda destilación la energía útil representa el 3.74%, durante este proceso es necesario elevar la temperatura lo suficiente para evaporar otros alcoholes y compuestos presentes en el primer destilado como el metanol. En esta etapa la energía perdida es mayor al 96% (Figura 6.10).

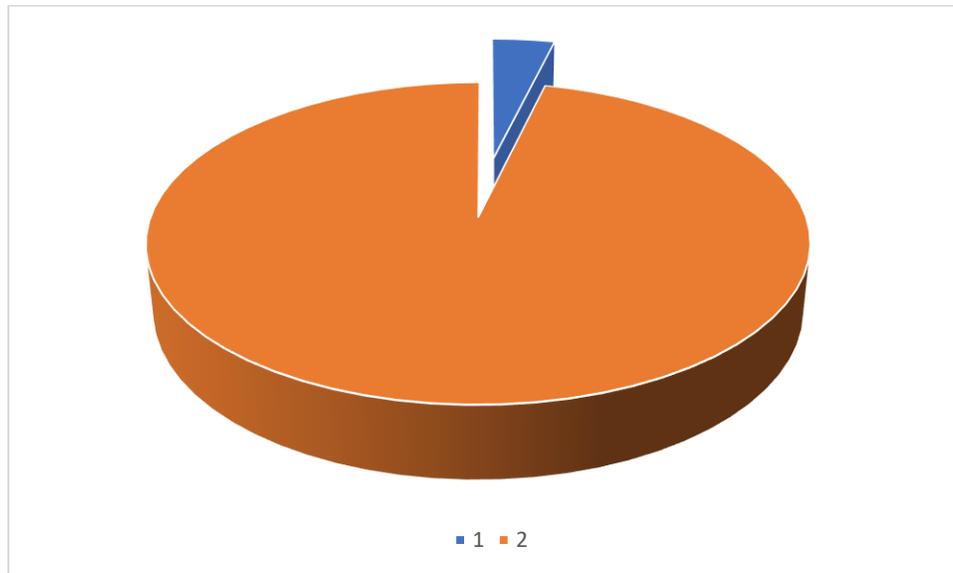


Figura 6.10 Distribución de la energía en el segundo destilado.

Finalmente se tiene una eficiencia total del proceso del 9.44%, la E_{in} que representa la suma de todos los flujos de energía (E_{in1} a E_{in5}) es de 504 GJ, de la cuál sólo se aprovechan 47.6 GJ (Figura 6.11) y más del 90.56% se pierde debido a varios factores: eficiencia térmica de la leña, materiales y equipos de cocción y destilación, métodos de vaciado y almacenado, aislamiento, etc.

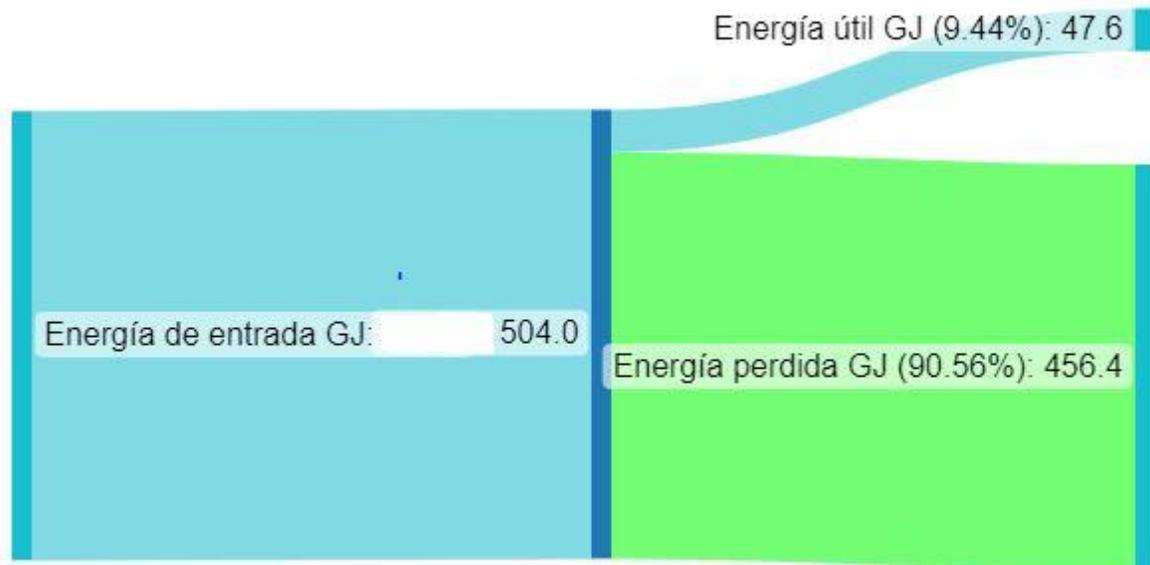


Figura 6.11 Flujo de energía del proceso de obtención de mezcal.

6.4 Propuesta de uso de residuos líquidos (vinaza)

Propuestas de codigestión

Las mezclas de biomasa que componen el codigestato se propusieron con base en diferentes criterios. Se consideró que la vinaza tiene una relación K alta, por encima de 52:1 al igual que el bagazo de agave de 116:1, en la propuesta No. 1 (Figura 6.12) se incluyen ambos residuos en combinación con un tipo de biomasa de uso común en biodigestores comerciales, cuya relación K es de 16:1.

Disminuyendo al mínimo la cantidad de bagazo, con este escenario se detectó que al tener una relación tan alta de K su proporción en la codigestión tendría que representar un porcentaje menor al 5% por lo que inicialmente no se considera un residuo que potencie la generación de biogás en conjunto con la vinaza y el estiércol porcino, resultando en una $K=28.7$, la cual se encuentra dentro de los parámetros óptimos.

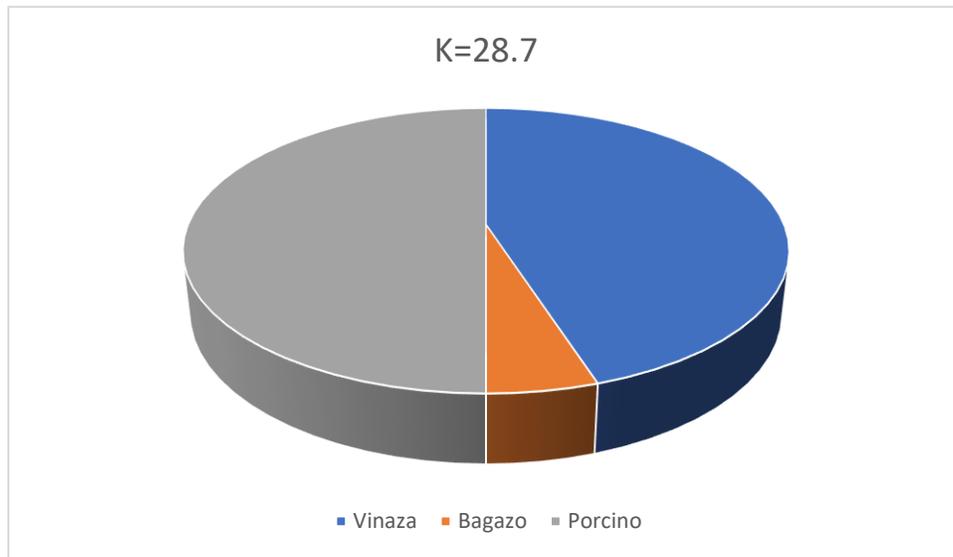


Figura 6.12 Propuesta de codigestión No. 1 (45% vinaza, 50% estiércol porcino, 5% bagazo).

En la propuesta No. 2 (Figura 6.13) se diversificó el origen de los residuos a 4 tipos de biomasa, de los cuales el 20% es vinaza, debido a que un 20% de este tipo de residuos ha demostrado mantener la estabilidad del proceso de biodigestión. En esta propuesta se tiene la relación K más alta (31) debido al alto contenido de nitrógeno inicial en la vinaza.

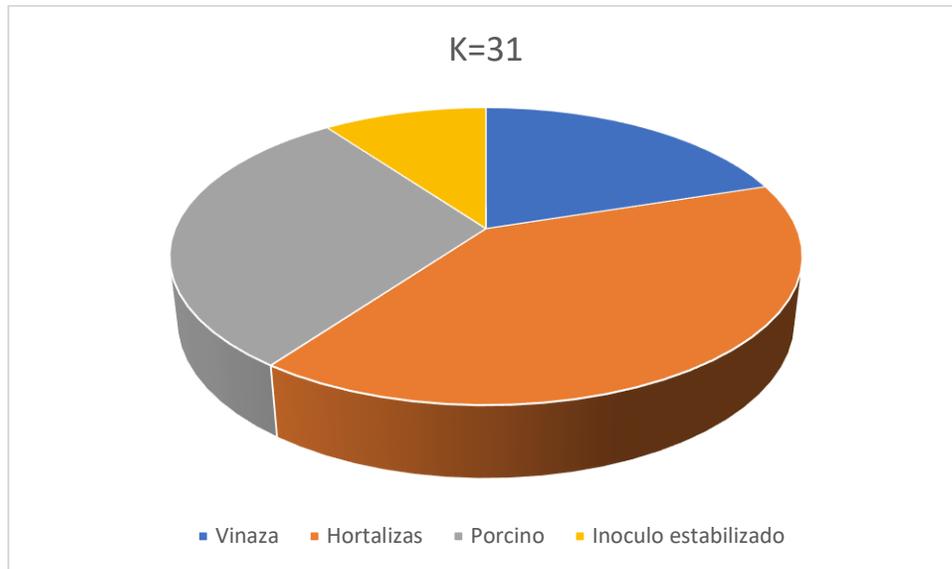


Figura 6.13 Propuesta de codigestión No. 2 (20% vinaza, 30% porcino, 40% hortalizas, 10% inóculo estabilizado).

El uso de hortalizas y estiércol de porcino se considera debido a la facilidad de acceso y cercanía de este tipo de residuos, además de la adición de un inóculo que permita la acción temprana de las bacterias.

La propuesta No. 3 se realizó con una mínima cantidad de vinaza en combinación con el bagazo y considerando un residuo común como la excreta humana, este residuo presenta una relación de C/N baja (3:1) ideal para balancear la relación de C/N alta de los residuos anteriores, como resultado se obtiene una K de 26 sin embargo, su manejo presentaría algunas dificultades y su pretratamiento incluye la remoción de coliformes o patógenos (Figura 6.14).

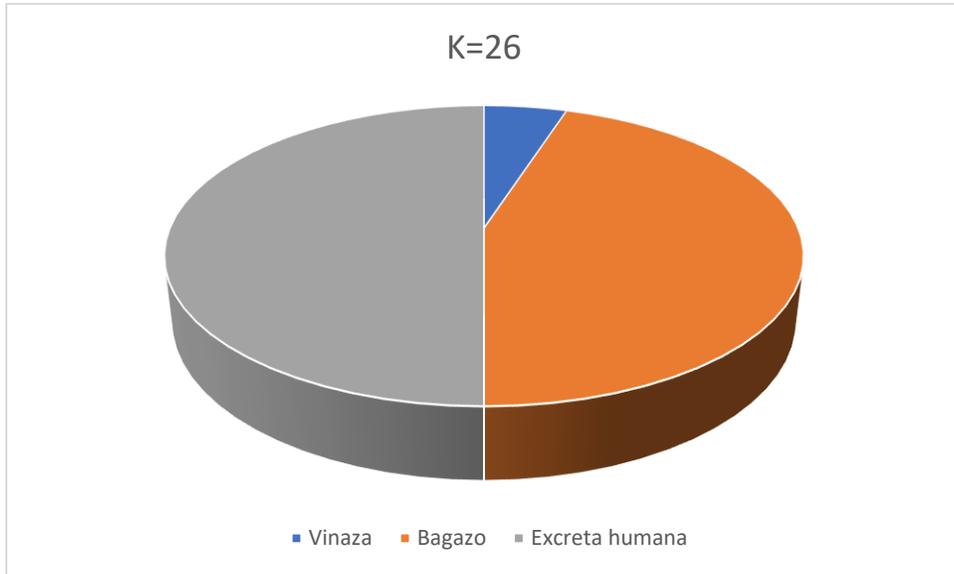


Figura 6.14 Propuesta de codigestión No. 3 (5% vinaza, 45% bagazo, 50% excreta humana).

Relación C/N

La relación C/N calculada para cada una de las combinaciones propuestas se muestra en la Figura 6.15. Se observa que esta relación se mantiene en un rango de 26 a 31 partes de Carbono por parte de Nitrógeno, siendo la propuesta uno la de menor valor y la propuesta 2 la de mayor valor. Ec 23

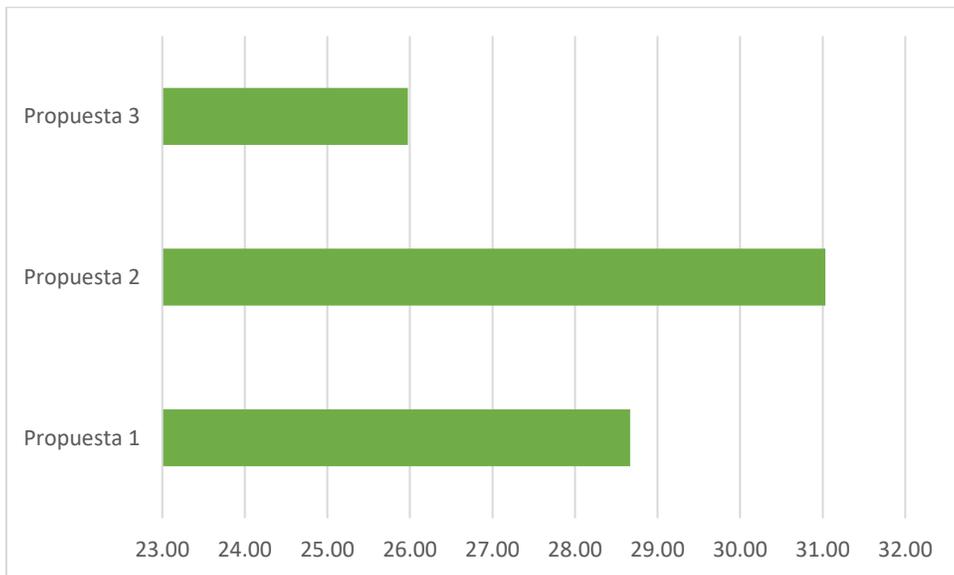


Figura 6.15 Relación C/N de las propuestas de codigestión.

Sólidos totales

Otro parámetro importante para comparar los codigestatos, es el porcentaje de sólidos totales. Tomando en cuenta los valores presentados en la Tabla 5.4 y la ecuación 23 se estimó el porcentaje de ST para cada uno.

Como se observa en la Tabla 6.1 este porcentaje varía por tipo de residuo, siendo el bagazo el de mayor requerimiento de agua dentro de la mezcla debido a su composición alta en celulosa y hemicelulosa, lo que lo hacen un compuesto fibroso y con mayor dificultad para su degradación.

Biomasa	Porcentaje de ST (%)	Porcentaje en mezcla (%)	Wagua (l agua x kg residuo)	Mezcla de 1 kg
Vinaza	4.9	45	-0.51	-0.23
Bagazo	65	5	5.50	0.28
Porcino	34.8	50	2.48	1.24
Deseado	10			1
			Wagua Total	1.29

Tabla 6.1 Porcentaje de ST y cantidad de agua añadida, propuesta 1.

Sin embargo, este valor se ve balanceado por el porcentaje que requiere la vinaza, ya que es un residuo líquido.

En el caso de la segunda propuesta (Tabla 6.2) la cantidad de Wagua total es la menor, debido a que el requerimiento de agua por tipo de residuo es mínimo, en el caso del inóculo al ser un consorcio de bacterias estabilizado no requiere de la adición de agua.

Tabla 6.2 Porcentaje de ST y cantidad de agua añadida, propuesta 2.

Biomasa	Porcentaje de ST (%)	Porcentaje en mezcla (%)	Wagua (l agua x kg residuo)	Mezcla de 1 kg
Vinaza	4.9	20	-0.51	-0.10
Hortalizas	13	40	0.30	0.12
Inoculo	10	10	0.00	0.00
Porcino	34.8	30	2.48	0.74
Deseado	10			1
			Wagua Total	0.76

La propuesta 3 es la de mayor requerimiento total de agua (2.8 partes de agua por 1 de biomasa), se aprecia (Tabla 6.3) que al menos el 80% de esta adición es debida a la presencia del bagazo en la mezcla.

Tabla 6.3 Porcentaje de ST y cantidad de agua añadida, propuesta 3.

Biomasa	Porcentaje de ST (%)	Porcentaje en mezcla (%)	Wagua (l agua x kg residuo)	Mezcla de 1 kg
Vinaza	4.9	5	-0.51	-0.03
Bagazo	65	45	5.50	2.48
Excreta humana	17	50	0.70	0.35
Deseado	10			1
			Wagua Total	2.80

Con los resultados obtenidos anteriormente se seleccionó la propuesta No. 2 para el dimensionamiento de un digestor debido a que el requerimiento de agua es el menor y la relación C/N de 31:1 aunque es alta, aún se encuentra dentro de los parámetros de funcionamiento de un digestor.

TRH

El TRH se calculó con la ecuación 27, resultando en 46 días para un biodigestor continuo, operando con la temperatura promedio del lugar (22.7 °C).

Biodigestor

El biodigestor se dimensionó considerando dos casos, en el primero con el total de biomasa líquida generada y el segundo con la mitad de biomasa (en kg). En la Tabla 6.4 se muestra el primer caso, en el que se tiene un total de 109,725 litros de biomasa y 83,391 litros de agua de acuerdo con el porcentaje de sólidos totales estimados en la Tabla 6.2, los cuales de acuerdo con los valores de la Tabla 5.6 producirán alrededor de 18,538 litros o 18m³ de biogás por día.

Tabla 6.4 Dimensionamiento de un biodigestor para el total de biomasa líquida generada.

Propuesta 2 (total de vinaza)	Cantidad (l)	Porcentaje en mezcla (%)	Producción de biogás diaria (m ³ /kg)	Producción de biogás diaria (m ³ /día)	Cantidad de agua añadida (l)	Volumen digestor (m ³)	Volumen laguna de secado (m ³)
Vinaza	21,945.00	20	0.005	104.95			
Hortalizas	43,890.00	40	0.350	15,361.50			
Inoculo	109,72.50	10	0.070	768.08			
Porcino	329,17.50	30	0.070	2,304.23			
TOTAL	109,725.00			18,538.75	83,391	256.84	98.75

Tabla 6.5 Dimensionamiento de un biodigestor para la mitad de biomasa líquida generada.

Propuesta 2 (50% vinaza)	Cantidad (l)	Porcentaje en mezcla (%)	Producción de biogás diaria (m ³ /kg)	Producción de biogás (m ³ /día)	Cantidad de agua añadida (l)	Volumen digestor (m ³)	Volumen laguna de secado (m ³)
Vinaza	10,973.00	20	0.005	52.47			
Hortalizas	21,945.00	40	0.350	7,680.75			
Inoculo	5,486.25	10	0.070	384.04			
Porcino	16,458.75	30	0.070	1,152.11			
TOTAL	54,863.00			9,269.37	41,695.50	128.42	49.38

En el segundo caso (Tabla 6.5) se observa una ventaja en el volumen del digestor, reduciéndolo a 128.2 m³ utilizando sólo 10,973 litros de vinaza. En este caso la producción diaria de biogás se estima en 9,269.37 m³ diarios.

6.5 Estimación del potencial energético de los residuos.

El potencial energético del biogás es de 7kWh/m³, considerando el total de vinaza producida en el proceso estudiado (21,945 litros) y una producción diaria de 18,538 m³ durante 30 de los 46 días del TRH, se estima que el potencial de los residuos tratados a través de un biodigestor, con la ecuación 33 es equivalente a $E_{vinaza} = 1,261$ GJ lo que equivaldría a 2.3 veces la energía de entrada requerida para la elaboración de un lote de mezcal (2,000 litros) o a 26.8 veces la energía útil requerida.

En el caso del potencial energético del bagazo, al considerarse que este sea convertido en briquetas, con un potencial calorífico de 19.5 MJ/kg se obtiene una $E_{bagazo} = 51$ GJ de los 6,545 kg de residuos producidos. Dicho potencial representa una décima parte de la energía requerida para la entrada del proceso, al ser sometida a combustión en una estufa con eficiencia del 40%.

6.6 Recomendaciones de mejora en la eficiencia energética del proceso

El potencial energético de los residuos se vería aumentado si se tomaran en cuenta las siguientes recomendaciones de eficiencia energética en el proceso:

- La implementación del biogás en las diferentes etapas del proceso, sometido al refinamiento (limpieza de impurezas en el gas) y quemado en un dispositivo eficiente como una caldera.
- La utilización de las 6 toneladas de jugos (como agua sobrecalentada) a través de un intercambiador de calor o en la reinyección del proceso, dicha energía se encuentra contenida en el rango de 70 a 80 °C.
- El proceso de fermentación se lleva a cabo en un fogón de leña abierto tradicional, por lo que la sustitución de esta tecnología con una estufa eficiente como se propone para la quema de leña o briquetas de bagazo, aumentaría la eficiencia de este proceso en al menos un 30%, con lo que se ahorraría un total de 16.3 GJ en esta etapa.
- La Implementación de otras tecnologías de calentamiento con base en fuentes renovables de energía como el uso de colectores solares.
- La sustitución parcial de piedras por cerámicos de reuso, que permitan disminuir el uso de piedra, escasa en la zona y la disminución de la energía útil del proceso al reducir el punto de fusión del material.

CONCLUSIONES

El acercamiento con la comunidad de mezcaleros permitió identificar diferentes problemáticas que aquejan a los productores, los cuales se han agudizado gracias a los efectos del cambio climático, como la escases de piedra y leña y falta de una disposición adecuada de residuos en la zona.

Los miembros de las diferentes mezcaleras se muestran con una total disposición para la adquisición de tecnologías y la implementación de mejoras en sus procesos con el objetivo de aumentar la calidad de su producto, reducir el gasto energético a nivel de horas hombre y del proceso y sobre todo conservar la imagen, calidad y prestigio del producto con un ahorro energético.

En el análisis realizado, se encontraron diferentes áreas de oportunidad tanto en la eficiencia de las etapas del proceso como en el uso de los residuos con fines energéticos.

El proceso de obtención del mezcal tiene una eficiencia menor al 5%, siendo la etapa de menor eficiencia la fermentación al realizarse en un fogón abierto y la de mayor eficiencia el horneado, considerando la geometría y materiales utilizados en el horno de cocción.

Los residuos del proceso representan más del 94% de la masa de entrada, de ellos, la vinaza es el residuo producido en mayor cantidad representando el 59%. Visto no como un residuo sino como un subproducto, este líquido tiene el potencial de abastecer 2.3 veces la demanda energética del proceso aún sin mejoras en la eficiencia, en codigestión con otros residuos de la zona.

Para asegurar el correcto funcionamiento del digester propuesto las vinazas serían sometidas a un pretratamiento (como la adición de compuestos nitrogenados o microalgas), previo a su entrada al digester se asegura un lodo estable, con una relación C/N menor y un pH balanceado a través de la adición de CaO, con esto se aumentará el rango de operación del digester y disminuirá la formación de compuestos inhibidores sin que esto implique la implementación de tecnologías costosas.

En el caso de las propuestas de codigestión, se considera que la propuesta 2 tendría una mayor estabilidad y se descartó el uso del bagazo por su relación alta de C/N y la necesidad de un pretratamiento que requiere la entrada de energía como la trituración (propuesta 1) o la eliminación de patógenos como se plantea en la propuesta No. 3.

En el caso del bagazo este la energía potencial disminuye debido a la tecnología de combustión utilizada y a que los residuos disponibles se generan en menor cantidad. Sin embargo, con el uso adecuado y en combinación de otros materiales, este potencial puede aumentar.

Dadas las áreas de oportunidad mencionadas como mejoras en la eficiencia energética del proceso, se estima que el aumento en la eficiencia por etapa aumente hasta en un 30% sin utilizar un equipo más sofisticado en el proceso como los enclaves industriales, ya que esto ocasionaría una modificación importante al proceso artesanal y un cambio de mayor inversión para el productor.

Se contempla que los resultados de este proyecto sean aplicados y estudiados de forma gradual en las mezcaleras Amores y Ramírez inicialmente, teniendo resultados preliminares de su aplicación se podrán escalar a mezcaleras en otras regiones del país con algunas de las cuales ya se ha establecido contacto.

Con los resultados obtenidos se contemplan trabajos futuros como artículos de divulgación, participación en congresos y la publicación de al menos un artículo de revista indexada, además de la colaboración con otros grupos de investigación en energía solar térmica, fotovoltaica y estudios sociales para la obtención de financiamiento y la implementación de prototipos en la región de Tixtla.

ANEXOS

Tabla A1. Valores reportados para sólidos totales en diversos residuos. Elaboración propia con datos de (FAO, 2011), (Robalino, 2011)

Tipo de residuo	Valor máximo	Valor mínimo
Ganado porcino	13.4	56.2
Ganado bovino	15	49
Ganado avícola	26	92
Ganado caprino	83	92
Ganado ovino	32	45
Ganado equino	19	42.9
Conejos	34.7	90.8
Humanos	17	-
Maíz	77	80
Trigo	82	90
Arroz	88	92.6
Cebada	88	90
Tubérculos (hojas)	10	20
Leguminosas (paja)	60	80
Hortalizas (hojas)	10	16
Desecho de verdura	12	-
Hierba fresca	24	-
Bagazo	65	-
Jacinto de agua	7	
Aserrín	74	80
Hojas secas	50	-
Lactosuero	3.5	-

Tabla A2. Valores reportados de K en diversos residuos.

Residuos animales	%C	%N	C/N
Bovinos	30	1.3	25:01:00
Equinos	40	0.8	50:01:00
Ovinos	35	1	35:01:00
Porcinos	25	1.5	16:01
Caprinos	40	1	40:01:00
Conejos	35	1.5	23:01
Gallinas	35	1.5	23:01
Patos	38	0.8	47:01:00
Pavos	35	0.7	50:01:00
Excretas humanas	2.5	0.85	03:01
Lactosuero	0.35	0.41	0.85:1
Residuos vegetales			
Residuos vegetales	%C	%N	C/N
Paja trigo	46	0.53	87:01:00
Paja cebada	58	0.64	90:01:00
Paja arroz	42	0.63	67:01:00
Paja avena	29	0.53	55:01:00
Rastrojos maíz	40	0.75	53:01:00
Leguminosas	38	1.5	28:01:00
Hortalizas	30	1.8	17:01
Tubérculos	30	1.5	20:01
Hojas secas	41	1	41:01:00
Aserrín	41	0.06	730:01:00
Melaza	40.77	0.25	166.2:1
Hojarasca de bosque	3.97	0.02	183.9:1
Vinaza de Tequila	28.8	0.55	<u>50:01:00</u>
Agave de Tequila	<u>50.6</u>	<u>0.53</u>	<u>95.5:1</u>
Vísceras de pescado	53.6	9.8	5.5

Tabla A3. Producción de biogás de diferentes residuos.

Tabla 3.1 Producción de biogás de especies animales. Fuente: Elaboración propia con datos de (Martínez, 2007); (Gipuzkoa, 2005); (Ashraf, 2016)	
Espece	Producción de biogás (m3 x kg de excreta)
Gallinas ponedoras	0.01
Otras aves de corral	0.015
Elefante	0.02
Camello	0.03
Bovino	0.04
Caballos	0.04
Pato	0.05
Paloma	0.05
Ovino Grande	0.06
Ovino Mediano	0.06
Ovino Pequeño	0.06
Avícola Grande	0.06
Avícola Mediano	0.06
Avícola Pequeño	0.06
Porcino	0.07
Caprino (Cabras madres)	0.07
Caprino (Cabritos, chivos)	0.07
Humano Adulto	0.07
Humano Niño	0.07

REFERENCIAS

- Agostinho-Da Silva, D. *et al.* (2014) 'Ecuaciones para estimar el poder calorífico de la madera de cuatro especies de árboles'. doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.09.035.
- Arimi, M. M. M. *et al.* (2020) 'Recent trends in applications of advanced oxidation processes (AOPs) in bioenergy production : Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, p. 109669. doi: 10.1016/j.rser.2019.109669.
- Aristizábal Hernández, J. D. (2014) 'Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo', pp. 12–24.
- Cengel, Y. A. and Boles, M. A. (2012) *Termodinámica*. 7ma edn. Edited by P. E. Roig Vázquez. México.
- Chávez-Guerrero, L. and Hinojosa, M. (2010) 'Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands', *Fuel*, 89(12), pp. 4049–4052. doi: 10.1016/j.fuel.2010.07.026.
- Chavez-Parga, M. D. C., Pérez Hernández, E. and González Hernández, J. C. (2016) 'Revisión del agave y el mezcal', *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1). doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552.
- CONAGUA (2022) *Información climatológica por estado, Sistema Meteorológico Nacional*. Available at: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=gro>.
- Crespo González, M. R. *et al.* (2018) 'Caracterización química y física del bagazo de agave tequilero compostado con biosólidos de vinaza como componente de sustratos para cultivos en contenedor', *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(3), pp. 373–382. doi: 10.20937/RICA.2018.34.03.01.
- Cuentas Alvarado, M. S. (2020) *Propiedades térmicas del basalto para almacenamiento de calor en viviendas del Altiplano*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Danilo, W. *et al.* (2017) 'Production of briquettes with Jatropha curcas shell and sugar cane bagasse', 38(3), pp. 527–533. doi: 10.4067/S0717-92002017000300010.
- Davis, S. C., Dohleman, F. G. and Long, S. P. (2011) 'The global potential for Agave as a biofuel feedstock', *GCB Bioenergy*, 3(1), pp. 68–78. doi: 10.1111/j.1757-1707.2010.01077.x.
- Deslandés, A. (2021) *Las imaginativas estrategias con las que los productores de mezcal en México tratan de superar el tremendo impacto de la pandemia*, *BBC News*. Available at: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-57360593>.
- DOF (2010) *Lista de combustibles que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como sus factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo*. Available at: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5128000&fecha=14/01/2010#gsc.tab=0.

DOF - Norma Oficial Mexicana (1994) *NOM-064-ECOL-1994*. México. Available at: [https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4865774&fecha=05/01/1995#:~:text=NORMA Oficial Mexicana NOM-064,que dice%3A Estados Unidos Mexicanos.](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4865774&fecha=05/01/1995#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM-064,que%20dice%3A%20Estados%20Unidos%20Mexicanos.)

DOF - Norma Oficial Mexicana (2009) *NOM-251-SSA1-2009*. México. Available at: <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3980/salud/salud.htm>.

DOF - Norma Oficial Mexicana (2016) *NOM-070-SCFI-2016*. México. Available at: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5472787&fecha=23/02/2017.

DOF - Norma Oficial Mexicana (2021) *NOM-001-SEMARNAT-2021*. México. Available at: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022.

Durán, H. M. and Pulido, J. L. (2007) 'Analysis of Agave Milling in the Process of Mescal Manufacturing', *Información Tecnológica*, 18(1), pp. 47–52.

Ferrer-gutiérrez, J. P. *et al.* (2021) 'Una perspectiva dual (convencional e impulsada por energía solar) sobre procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de vinazas de Agave cocui', *Applied and Analytical Chemistry*, 50(2), pp. 15–23.

Gallardo Valdez, J. (2019) *Industria del tequila y generación de residuos*, CONACyT Ciencia y Desarrollo. Available at: [https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=287#:~:text=En la elaboración de tequila,el bagazo y las vinazas.](https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=287#:~:text=En%20la%20elaboraci3n%20de%20tequila,el%20bagazo%20y%20las%20vinazas.)

García-depraect, O., Díaz-cruces, V. F. and León-becerril, E. (2020) 'Upgrading of anaerobic digestion of tequila vinasse by using an innovative two-stage system with dominant lactate-type fermentation in acidogenesis', *Fuel*, 280(June), p. 118606. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118606.

García-Ochoa, R. and Graizbord, B. (2016) 'Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional', *Economía Sociedad y Territorio*, p. 289. doi: 10.22136/est002016465.

García-Soto, M. J. *et al.* (2011) 'Kinetic study of the thermal hydrolysis of agave salmiana for mezcal production', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), pp. 7333–7340. doi: 10.1021/jf200026y.

García Méndoz, J. (2018) *México cuenta con 159 especies de agave; investigadores de la UNAM encontraron 4 nuevas*, *Boletín UNAM-DGCS-045*. Available at: https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_045.html.

Gatto, A. and Bussato, F. (2020) 'Energy vulnerability around the world: The global energy vulnerability index (GEVI)', *Journal of Cleaner Production*.

Gómez-Guerrero, A. V. *et al.* (2019) 'Co-digestion of Agave angustifolia haw bagasse and vinasses for biogas production from mezcal industry', *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(3), pp. 1073–1083.

Gómez G, A. (2014) *Producción de biogás a partir de bagazo y vinaza del agave*

angustifolia haw generada como residuo en la elaboración de mezcal. Instituto Politécnico Nacional.

González García, Y., González Reynoso, O. and Nungaray Arellano, J. (2005) 'Potencial del bagazo de agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbihdrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos', *e-Gnosis*, 3. Available at: <https://www.redalyc.org/pdf/730/73000314.pdf>.

Hakika, D. C. *et al.* (2019) 'Decreasing COD in Sugarcane Vinasse Using the Fenton Reaction : The Effect of Processing Parameters'.

Iñiguez, G. and Hernández, R. (2010) 'Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimerico de poliacrilamida (PAM)', 26(4), pp. 299–311.

De León-Rodríguez, A. *et al.* (2008) 'Optimization of fermentation conditions for the production of the mezcal from Agave salmiana using response surface methodology', *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(1), pp. 76–82. doi: 10.1016/j.cep.2007.08.010.

León, E. K. C. *et al.* (2020) 'Cocui como medio para el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae*'.

López Velarde Santos, M. *et al.* (2019) 'Inoculum adaptation for the anaerobic digestion of mezcal vinasses', *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(2), pp. 447–458. doi: 10.20937/RICA.2019.35.02.15.

Lutgens, Frederick K., Tarbuck, E. J. (2000) *Essentials of Geology*. 7th Ed.

Madlala, N. E., Eloka-eboka, A. C. and Lokhat, D. (2021) 'Effect of Pith / Fiber Separation , Binders and Hybridization on Energy Density and Physical Properties of Bagasse Briquettes', 2021, pp. 1–11.

Manrique, S. *et al.* (2021) *Sistemas de biomasa y bioenergía: Casos ejemplares en iberoamérica*. Edited by U. publicación de la red I. de T. de B. y B. R. (ReBiBir-T). Madrid, España: CYTED Ediciones.

Martínez, J. M. *et al.* (2020) 'Life cycle environmental impacts and energy demand of craft mezcal in Mexico', *Sustainability (Switzerland)*, 12(19), pp. 1–17. doi: 10.3390/su12198242.

Muñoz Solares, M. (2016) *Potential energy vinaza for use as fuel*, Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. Available at: https://www.researchgate.net/publication/301358757_POTENTIAL_ENERGY_VINAZA_FOR_USE_AS_FUEL.

NASA (2022) *Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER)*. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

Navarrete-Magaña, A. M. (2016) *Producción de biogás a partir del bagazo de agave*

pulquero utilizando la radiación solar y catalizadores sólidos. Posgrado en Ciencias Químicas.

Del Nery, V. *et al.* (2018) 'Hydraulic and organic rates applied to pilot scale UASB reactor for sugar cane vinasse degradation and biogas generation', *Biomass and Bioenergy*, 119(March), pp. 411–417. doi: 10.1016/j.biombioe.2018.10.002.

ONPE, G. (2022) *Causas de la pobreza energética y medidas*, Gipuzkoa, Observatorio de pobreza energética. Available at: <https://www.gipuzkoa.eus/es/web/ingurumena/energia/observatorio-pobreza-energetica/causas-pobreza-energetica-medidas>.

Ordaz Díaz, L. A. *et al.* (2019) 'Aprovechamiento de los subproductos valiosos de la industria del mezcal en Durango', *Revista Ciencia Administrativa*, 1(1), pp. 12–21.

Palacios-Bereche, M. C., Palacios-Bereche, R. and Nebra, S. A. (2020) 'Comparison through energy, exergy and economic analyses of two alternatives for the energy exploitation of vinasse', *Energy*, 197, p. 117231. doi: 10.1016/j.energy.2020.117231.

Robles-González, V. *et al.* (2012) 'Treatment of mezcal vinasses : A review', 157, pp. 524–546. doi: 10.1016/j.jbiotec.2011.09.006.

Robles-González, V., Galíndez-Mayer, J. and Rinderknecht-Seijas, N. (2012) 'Treatment of mezcal vinasses : A review', 157, pp. 524–546. doi: 10.1016/j.jbiotec.2011.09.006.

Rodríguez Contreras, F. E., Martínez Rivera, L. M. and Palomera García, C. (2017) 'Contextualización socioambiental del agave en Tonaya, Jalisco, México', *Región y Sociedad*, 70(70).

Rodríguez Cortés, A. (2016) *Fermentación anaerobia de la vinaza mezcalera para la obtención de productos de valor industrial*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Rodríguez, R. (2015) 'Generación de Biogás a partir del lactosuero ácido', *INTI Ambiente*.

SAGARPA (2017) *Planeación agrícola nacional 2017-2030. Agave Tequilero y mezcalero mexicano*. México.

SAGARPA (2020) *Guerrero, y su tradicional bebida el Mezcal, Segundo Lugar en Producción, Representación AGRICULTURA Guerrero*. Available at: <https://www.gob.mx/agricultura/guerrero/articulos/guerrero-y-su-tradicional-bebida-el-mezcal-segundo-lugar-en-produccion?idiom=es>.

Saucedo-Luna, J. *et al.* (2010) 'Sacarificación del bagazo de agave tequilana weber', 1(3), p. 245.

Sauza, C. (2021) *Todo sobre el tequila*. Available at: <https://www.casasauza.com/todo-sobre-tequila/page/2>.

Scheinvar, E. (2021) *Agave, mezcal tradicional, cultura y diversidad*, *Revista Oikos*. Available at: <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/todos-los->

numeros/articulos-anteriores/303-agave-y-mezcal.

Secretaría de Economía (2022) *Tixtla de Guerrero, Data México*. Available at: <https://datamexico.org/es/profile/geo/tixtla-de-guerrero>.

Serra, L. (2021) *Vulnerabilidad y pobreza energética en México ¿Primero los pobres?, Energía hoy*. Available at: <https://energiahoy.com/2021/06/03/vulnerabilidad-y-pobreza-energetica-en-mexico-primero-los-pobres/>.

Siddique, M. N. I. and Wahid, Z. A. (2018) 'Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion : A review', *Journal of Cleaner Production*, 194(1), pp. 359–371. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.155.

Soto, J. (2020) *¿Qué es la pobreza energética y por qué la sufrimos en México?, Green Peace*. Available at: <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/8406/que-es-la-pobreza-energetica-y-por-que-la-sufrimos-en-mexico/>.

Tadeu, L. *et al.* (2017) 'Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse', *Applied Energy*, 189, pp. 480–491. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.071.

Tadeu, L. and Loureiro, M. (2015) 'Bioenergy from stillage anaerobic digestion to enhance the energy balance ratio of ethanol production', *Journal of Environmental Management*, 162, pp. 102–114. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.07.046.

Tadeu, L., Loureiro, M. and Zaiat, M. (2018) 'Science of the Total Environment Seasonal characterization of sugarcane vinasse : Assessing environmental impacts from fertirrigation and the bioenergy recovery potential through biodigestion', *Science of the Total Environment*, 634, pp. 29–40. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.326.

Terry Calderon, V. M. (2019) 'Modelo físico matemático de las constantes cinéticas en la biodegradación anaeróbica de la vinaza', 2(1), pp. 127–140.

Trapala, J. *et al.* (2020) 'Purification and characterization of an inulinase produced by a *Kluyveromyces marxianus* strain isolated from blue agave bagasse', *Protein Expression and Purification*, 176(April). doi: 10.1016/j.pep.2020.105718.

Velazquez-Jimenez, L. H., Pavlick, A. and Rangel-Mendez, J. R. (2013) 'Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water', *Industrial Crops and Products*, 43(1), pp. 200–206. doi: 10.1016/j.indcrop.2012.06.049.

Whitaker, S. *et al.* (2017) 'Methanol Production Kinetics During Agave Cooking for Mezcal Industry Cinéticacin Cinética De Produccí Onproduccí Produccí on De Metanol Durante La Coccí Oncocci Coccí on Del Agave En La Industria Del Mezcal', 16(3), pp. 827–834. Available at: www.rmiq.org.