



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®**

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Estudio de la sostenibilidad ambiental del proceso artesanal de mezcal

**Presentada por:
Ing. Jessica Martinez Gomez**

**Como requisito para la obtención del grado de Maestra en Ciencias de la
Ingeniería**

***Director de tesis
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez***

***Codirectora de tesis
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo***



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Dirección

Cuernavaca, mor., 13/julio/2025

OFICIO No. MCI/077/2025
Asunto: **Autorización de Impresión de tesis**
CENIDET-AC-004-M17-OFCIO

JESSICA MARTÍNEZ GOMEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE

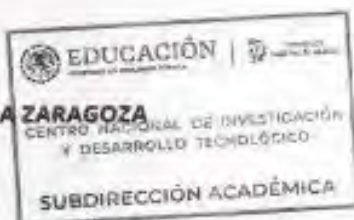
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado al trabajo de tesis titulado **"ESTUDIO DE LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DEL PROCESO ARTESANAL DE MEZCAL"** ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"


DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



C.c.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas
Jefa Del Departamento De Servicios Escolares
Expediente
RAVM/ang





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Dirección

Cuernavaca, Mor., 03/ julio/ 2025

OFICIO No. MCI/073/2025
Asunto: **Aceptación de documento de tesis**
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de **Jessica Martinez Gomez**, con número de control M23CE126, estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"ESTUDIO DE LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DEL PROCESO ARTESANAL DE MEZCAL"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DR. RODOLFO AMALIO VARGAS MÉNDEZ
Director de tesis

DRA. GLORIA LILIA OSORIO GORDILLO
Codirectora de Tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
Revisor 1

M.C. SILVIA PATRICIA PÉREZ SABINO
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
RAVM/ang



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca - Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4921.
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet



Dedicatoria

A las personas que amo:

Mi preciosa familia.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECITHI), por su contribución económica recibida y su compromiso con la investigación.

Al Instituto Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por abrir sus puertas para ser el pilar receptor de nuevos conocimientos y oportunidades.

A mis padres por creer en mí, por su amor, confianza y apoyo incondicional.

A mis directores de tesis por su entrega y dedicación a su profesión, por la paciencia y excelente orientación que me brindaron en cada paso de este nuevo camino.

A mi comité revisor por todas sus observaciones y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A mi propio esfuerzo.

A las casualidades de la vida, por las nuevas personas que ahora me acompañan.

En general a todos los buenos amigos que me rodean y apoyan siempre de alguna u otra forma, muchas gracias.

Resumen

La demanda nacional e internacional de mezcal presentó un incremento exponencial, generando alrededor de 12 millones de litros en el año 2023. Para lograrlo, se emplean grandes cantidades de recursos naturales (agua, agave, leña), en donde, además del producto final se obtiene en igual o mayor magnitud residuos sólidos (bagazo, vinaza, pencas de agave), así como, emisiones contaminantes durante el proceso (CO_2 o CO). Tomando como referencia la alta tasa de producción y consumo, y dados los precedentes de acciones con potencial contaminante en otros productos de rápido crecimiento como el mezcal, fue necesario conocer el manejo y control que se tiene sobre esta producción. Para ello, se realizaron entrevistas a productores artesanales, donde se evidenció una falta de conciencia sobre la cuantificación de residuos y consumo de recursos. Los resultados identificaron puntos clave de contaminación y se propusieron indicadores de sostenibilidad aplicables para una gestión ambiental efectiva.

Se presentan los resultados obtenidos mediante la herramienta Bizagi del modelo conceptual en Business Process Model and Notation (BPMN) del proceso de producción artesanal de mezcal en Oaxaca, buscando ofrecer una perspectiva integral de la sostenibilidad ambiental en la producción, revelando áreas críticas de mejora. El estudio concluye con recomendaciones de prácticas ambientales mejoradas, buscando reducir el impacto ambiental y promover una producción de mezcal sostenible. Se destaca la necesidad de implementar indicadores que permitan a los productores comprender y gestionar su impacto ambiental de manera efectiva.

Palabras clave: Sostenibilidad, Mezcal, BPMN, Vinaza, Bagazo.

Abstract

In recent years, the national and international demand for mezcal has increased exponentially, generating around 12 million liters in 2023. To achieve this, large amounts of natural resources are used (water, agave, wood), and at the end of the process, in addition to the final product, solid waste (bagasse, vinasse, agave stalks) is obtained in equal or greater magnitude, as well as polluting emissions during the process (CO_2 o CO). Give the high rate of production and consumption and give the precedents of actions with polluting potential in other fast-growing production. To this end, interviews were conducted with artisanal producers, which revealed a lack of awareness regarding the quantification of waste and resources consumption. The results identify key points of contamination and propose applicable sustainability indicators for more effective environmental management.

The results obtained through the Bizagi tool of the conceptual model in Business Process Model and Notation (BPMN) of the artisanal mezcal production process in Oaxaca are presented, seeking to offer an integral perspective of environmental sustainability in production, revealing critical areas for improvement. The study concludes with recommendations for improved environmental practices, seeking to reduce environmental impact and promote sustainable mezcal production. It highlights the need to implement indicators that allow producers to understand and manage their environmental impact more effectively.

Keywords: Sustainability, Mezcal, BPMN, Vinasse, Bagasse.

Contenido	Pág.
Figuras	ix
Tablas	ix
CAPÍTULO I	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Planteamiento del problema	4
1.4 Objetivos	5
1.5 Alcances y limitaciones	5
1.6 Estado del arte	6
1.7 Organización del documento	8
CAPÍTULO II	9
2.1 Marco teórico	9
2.1.1 Agave	9
2.1.2 Destilación	9
2.1.3 Indicador de sostenibilidad	10
2.1.4 Mezcal.	10
2.1.6 Normas relacionadas a la producción de mezcal.	11
2.1.7 Objetivo De Desarrollo Sostenible	14
2.1.8 Proceso de producción de mezcal artesanal	15
2.1.9 Tipos de agave más utilizados para la producción de mezcal	17
2.1.10 Sostenibilidad	18
2.1.11 Teoría de modelado	19
2.1.5 Modelos para el análisis de la sostenibilidad	20
2.2 Panorama de la dimensión ambiental en la producción de mezcal.	22
Capítulo III	24
3.1 Metodología de investigación	24
3.1.1 Diseño de la investigación	24
3.1.2 Descripción de la población de estudio	26
3.1.3 Recopilación de información	28
3.1.4 Modelo conceptual BPMN	34
3.1.5 Análisis del inventario (Balance de materia y energía)	34
3.1.6 Conclusiones	36

Capítulo IV	38
<i>4. Resultados</i>	<i>38</i>
<i>4.1 Indicador de emisiones en la producción de mezcal</i>	<i>40</i>
<i>4.1.1 Contexto y justificación</i>	<i>40</i>
<i>4.1.2 Metodología para la estimación de emisiones</i>	<i>41</i>
<i>4.1.3 Resultados: Emisiones por combustión de leña</i>	<i>41</i>
<i>4.1.3 Alternativa Sostenible: Briquetas de bagazo</i>	<i>42</i>
<i>4.2.1 Alternativa: Ósmosis inversa y/o Filtración Multimedia</i>	<i>49</i>
<i>4.2.2 Análisis costo efectividad</i>	<i>52</i>
<i>4.3 Indicador de desechos de producción</i>	<i>54</i>
<i>4.3.1 Indicador de residuo: Vinazas</i>	<i>54</i>
<i>4.3.2 Alternativa: Co - compostaje con Residuos Orgánicos</i>	<i>55</i>
<i>4.3.3 Análisis costo - efectividad</i>	<i>55</i>
<i>4.4 Indicador de residuos: Bagazo</i>	<i>57</i>
<i>4.4.1 Alternativa: Briquetas de bagazo</i>	<i>58</i>
<i>4.4.2 Análisis costo - efectividad</i>	<i>58</i>
<i>4.5 Indicador de residuos: Pencas de agave</i>	<i>59</i>
<i>4.5.1 Alternativa: Alimento para animales</i>	<i>60</i>
<i>4.5.2 Análisis de Costo – Efectividad.</i>	<i>60</i>
Capítulo V	62
<i>5.1 Conclusiones</i>	<i>62</i>
<i>5.2 Trabajos futuros</i>	<i>64</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>65</i>
<i>Anexo</i>	<i>71</i>

Figuras

Figura 1. Modelado BPMN del proceso de producción artesanal de mezcal	17
Figura 2. Modelo matemático y no matemático.	19
Figura 3. Modelo para el análisis de la sostenibilidad [62] .	21
Figura 4. Metodología de investigación.	24
Figura 5. Consideración medioambiental.	29
Figura 6. Materia prima predominante en la producción de mezcal	29
Figura 7. Origen de los recursos naturales en la producción de mezcal.	30
Figura 8. Reutilización de recursos empleados en la producción	31
Figura 9. Desechos de la producción de mezcal	32
Figura 10. Prácticas de reutilización de los residuos	32
Figura 11. Registro de cantidades de materia prima utilizada	33
Figura 12. Registro de residuos generados	33
Figura 13. Proceso de producción artesanal de mezcal.	34
Figura 14. Modelado BPMN del proceso de producción artesanal de Mezcal	39

Tablas

Tabla 1. Normas Vigentes aplicables a la producción de mezcal [38].	11
Tabla 2. Leyes aplicables para la sustentabilidad [40].	14
Tabla 3. Categorización de la producción de mezcal.	15
Tabla 4. Agave utilizado para la producción de mezcal	17
Tabla 5. Elementos para modelado en BPMN.	25
Tabla 6. Recopilación de información (entradas y salidas) del proceso.	35
Tabla 7. Balance de materia y energía de la producción de mezcal	35
Tabla 8. Emisiones de CO ₂ y CO por combustión de leña	41
Tabla 9. Demanda energética de la producción.	44
Tabla 10. Cálculo de emisiones de CO ₂	45
Tabla 11. Datos base cuantitativos para la producción de mezcal.	46
Tabla 12. Cálculo de emisiones de CO ₂	47
Tabla 13. Datos comparativos de la producción (Leña vs Briquetas)	47
Tabla 14. Datos comparativos para la producción (Ósmosis inversa vs Filtración multimedia)	53
Tabla 15. Aspectos económicos considerados de la alternativa.	57

CAPÍTULO I

Introducción

En México la producción, consumo y exportación de bebidas alcohólicas es significativa, entre estas se destaca la producción de cerveza, tequila, wiski y en años recientes el mezcal ha incrementado su popularidad, logrando posicionarse además del tequila, como una bebida representativa del país, llena de cultura y tradición.

1.1 Introducción

La demanda nacional e internacional de mezcal ha crecido de manera exponencial, con una tasa de crecimiento del 74.89% en 2022 y una producción nacional que supera los 14 millones de litros, de los cuales el 91.31% proviene de Oaxaca. La producción de mezcal requiere grandes volúmenes de insumos: para un solo litro se necesitan entre 15 y 20 kg de agave, 7 a 8 kg de leña y aproximadamente 20 litros de agua, lo que ha intensificado la presión sobre los recursos naturales (agave, leña y agua), cuya gestión inadecuada puede comprometer la sostenibilidad ambiental.

En un contexto de creciente demanda y producción de mezcal, resulta importante evaluar y mitigar el impacto ambiental asociado a los métodos tradicionales de elaboración. Esta investigación se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 12, que promueve patrones de consumo y producción responsables, buscando asegurar la disponibilidad de recursos para las generaciones presentes y futuras.

La problemática radica en la necesidad de identificar y cuantificar los componentes ambientales significativos que intervienen en la producción artesanal de mezcal. Debido a que la ausencia de registros precisos sobre el consumo de recursos y la generación de residuos limita la adopción de prácticas sostenibles y eficientes en la gestión ambiental. A pesar de la percepción común de que la elaboración artesanal es inherentemente amigable con el medio ambiente, esta investigación revela áreas de mejora en términos de sostenibilidad ambiental, desde la extracción de materias primas como el agave, la leña y el agua, hasta la gestión de los residuos generados en cada etapa del proceso.

Esta investigación tiene como objetivo general diseñar un modelo conceptual de sostenibilidad ambiental para el proceso de producción artesanal de mezcal. Para lograrlo, se analizó el proceso de producción en Oaxaca, determinando los componentes ambientales significativos, para diseñar un modelo conceptual utilizando la herramienta Business Process Model and Notation (BPMN), con lo que se formularon recomendaciones para incluir prácticas ambientales que reduzcan el impacto y promuevan la sostenibilidad. La metodología empleada se basa en el modelado del proceso productivo mediante BPMN, un análisis del inventario de materiales y energía, la recopilación de datos a través de entrevistas a productores de mezcal en Oaxaca, y la evaluación e interpretación del impacto ambiental resultante. El análisis de las entrevistas reveló una falta de conciencia generalizada sobre la cuantificación de residuos y el consumo de recursos, lo que subraya la necesidad de implementar indicadores de sostenibilidad para una gestión ambiental más efectiva.

Se busca ofrecer una perspectiva integral sobre la sostenibilidad en la producción artesanal de mezcal, identificando áreas de oportunidad para reducir el impacto ambiental y promoviendo prácticas responsables con el medio ambiente.

1.2 Antecedentes

El mezcal es una bebida alcohólica tradicional mexicana cuya elaboración artesanal se remonta a tiempos prehispánicos, constituyendo un símbolo de identidad y orgullo nacional [1]. Su proceso de producción, basado en la destilación y rectificación de mostos¹ preparados a partir de los azúcares extraídos de las cabezas maduras de diversas especies de agave, ha evolucionado a lo largo de los siglos, consolidándose como una de las bebidas emblemáticas del país [2], [3].

La industria del mezcal inició formalmente en el siglo XVI, aunque su desarrollo fue lento, debido a que la producción artesanal era considerada ilegal, realizándose de manera clandestina. No obstante, en las últimas décadas, la regulación y el impulso institucional han permitido su crecimiento y formalización, destacando la obtención de la Denominación de origen (DO) en 1994. Esta denominación ha otorgado ventajas competitivas significativas, recientemente fue obtenida por el estado de Morelos, después de comprobar que el mezcal

¹ Líquido obtenido después de la molienda (jugo de agave)

también tuvo raíces prehispánicas en varias zonas del estado, además de contar con un número significativo de productores según reportó el Gobierno del estado de Morelos durante la transmisión del anuncio de la denominación en junio 2025 [4]. Actualmente quien se posiciona con mayor aprovechamiento de la denominación es especialmente el estado de Oaxaca, principal productor nacional, que se ha posicionado como la “Capital Mundial del Mezcal” y ha visto en el mezcal una fuente relevante de ingresos turísticos y culturales [5], [6]. El reconocimiento internacional del mezcal ha propiciado su expansión en mercados globales, con presencia en más de 32 países y una demanda creciente que, en 2022, registro una tasa de crecimiento del 74.89% respecto al año anterior [7]. La producción nacional alcanzo poco más de 14 millones de litros, de los cuales Oaxaca contribuyo con el 91.31%. este auge ha sido acompañado por una proliferación de empresas y una diversidad de procesos productivos, donde el 92% corresponde a métodos artesanales, el 1% a procesos ancestrales y el 7 % a procesos industriales [6], [8], [9].

México destaca a nivel mundial por su diversidad de agaves, con 159 especies de las 210 registradas globalmente, de las cuales 119 son endémicas [10]. En Oaxaca se distribuyen naturalmente 35 especies, representando el 22% del total nacional. Para la elaboración de mezcal se emplean aproximadamente 28 especies a nivel nacional, aunque solo entre doce y quince son consideradas agaves mezcaleros de uso frecuente [9]. Cada tipo de mezcal está asociado a una especie de agave y a una región específica, lo que contribuye a la riqueza organoléptica y cultural de la bebida. El agave mezcalero es una planta de la familia de las amarilidáceas, requiere entre siete y diez años para alcanzar la madurez, sin embargo, este ciclo puede variar según la región y la especie. El proceso de producción de mezcal demanda importantes volúmenes de recursos naturales, principalmente agave, leña y agua. Para la obtención de un solo litro de mezcal artesanal se requiere entre 15 y 20 kg de agave, 7 – 8 kg de leña y aproximadamente 20 litros de agua [8]. El incremento en la producción ha intensificado la presión sobre estos recursos, generando preocupaciones entorno a la sostenibilidad ambiental y la gestión eficiente de insumos y residuos. Los datos obtenidos mediante instrumentos aplicados a productores en Oaxaca evidencian que no existen un registro preciso del consumo de recursos, lo que limita la adopción de prácticas productivas sostenibles y la eficiencia en la gestión ambiental.

El crecimiento acelerado de la industria mezcalera ha traído consigo retos significativos. Entre ellos destacan la sobreexplotación de recursos naturales, la generación de residuos sólidos y líquidos, principalmente bagazo, vinazas, pencas de agave y la contaminación ambiental asociada a la disposición inadecuada de estos subproductos. Diversos estudios señalan que los residuos generados pueden alterar las características del suelo y los cuerpos de agua, afectando la biodiversidad y los ecosistemas locales. A pesar de la percepción de que la producción artesanal es intrínsecamente amigable con el medio ambiente, la evidencia muestra la necesidad de mejorar la gestión de residuos y la eficiencia en el uso de recursos.

En el contexto actual, el término sostenibilidad ha cobrado relevancia, aunque su aplicación efectiva en la industria mezcalera enfrenta desafíos. La finalidad económica predomina sobre la consideración de impactos ambientales futuros, lo que puede comprometer la viabilidad a largo plazo de los sistemas productivos y la conservación de la diversidad biológica y cultural. Variedades como el agave espadín podrían enfrentar procesos de industrialización similares a los del agave azul, con riesgo de pérdida de diversidad genética y cultural. Adicionalmente, el auge del mezcal en mercados internacionales ha generado dinámicas económicas complejas, empresas nacionales y transnacionales han asumido el control, limitando el acceso a los productores tradicionales a los beneficios del comercio.

1.3 Planteamiento del problema

La producción de mezcal a nivel nacional en 2023 equivale a 12,239,655 litros, la producción artesanal representa el 93.71 % de la producción nacional total, siendo el estado de Oaxaca el mayor productor cubriendo el 90.51 % de la producción. Aunque el estado de Oaxaca se posiciona como el mayor productor de mezcal a nivel nacional; se tienen pocos registros sobre la disposición de los residuos durante esta práctica. La sostenibilidad ambiental a largo plazo del proceso productivo del mezcal artesanal podría verse comprometida por el aumento desmesurado de la producción, evidenciado por datos del Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A.C. (COMERCAM). Por lo que evaluar el impacto ambiental de las prácticas durante el proceso productivo, resulta importante. Aunque a menudo estos procesos al estar sujetos al termino artesanal suelen pasar desapercibidos y ser considerados amigables con el me

dio ambiente, la realidad es que no se evalúan a profundidad los niveles de impacto ambiental que pueden generar.

Esta investigación se alinea con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), busca identificar y cuantificar los componentes ambientales significativos en la producción artesanal de mezcal. A pesar de la percepción de ser un proceso amigable con el medio ambiente, la falta de cuantificación de residuos y consumo de recursos impide una gestión eficiente. Esta falta de medición no permite su preservación para las necesidades futuras. La problemática radica en la necesidad de abordar la sostenibilidad desde una perspectiva ambiental centrada en la producción artesanal de mezcal, buscando revertir la tendencia hacia un daño ambiental paulatino.

1.4 Objetivos

1.4.1 General.

Diseñar un modelo conceptual de sostenibilidad ambiental basado en el proceso de producción artesanal de mezcal, para proporcionar herramientas que permitan propiciar una mejora ambiental.

1.4.2 Específicos.

- Analizar el proceso de producción de mezcal artesanal del estado de Oaxaca para identificar áreas potenciales de mejora en términos de sostenibilidad.
- Determinar los componentes ambientales significativos involucrados en la producción de mezcal, para entender su impacto en el medio ambiente.
- Crear un modelo conceptual del proceso de producción artesanal de mezcal mediante la herramienta (BPMN).
- Formular recomendaciones para incluir prácticas ambientales dentro del proceso de producción de mezcal artesanal, con el objetivo de reducir el impacto ambiental y promover la sostenibilidad.

1.5 Alcances y limitaciones

- Se tomará como referencia el estado de Oaxaca, debido a que se ubica como el principal productor de mezcal a nivel nacional.

- Debido a la extensión territorial y la dispersión de regiones productoras de mezcal, se llevó a cabo el estudio de campo durante una reunión de productores celebrada en Julio 2024 en Oaxaca centro.

1.6 Estado del arte

El estudio del estado del arte en torno a la sostenibilidad de la producción de mezcal, inicia con la revisión y análisis del mercado maguey-mezcal [11], que examina variables macroeconómicas como oferta, demanda y dinámicas de comercialización. Este marco se completó con estudios sobre la regulación de modelos de negocios familiarizados con la producción artesanal de mezcal [12], y el análisis de cadenas de valor [13], asociadas a la denominación de origen del mezcal [14]. Por otra parte, se incluye el análisis económico de la producción de mezcal en Oaxaca [15] y la innovación impulsada por mujeres productoras para aportes sostenibles [16], para posteriormente enfocar el tema en la dimensión ambiental.

La delimitación temática implicó una transición metodológica desde el enfoque tridimensional de la sostenibilidad (económico, social, ambiental) hacia un análisis exclusivo de la dimensión ambiental. En este contexto se priorizaron investigaciones como los como “Estudios preliminares para el establecimiento de un signo distintivo de protección para los mezcales proveniente de agaves silvestre de la mixteca alta de Oaxaca, México” [17], que fundamentan el reconocimiento institucional de la producción artesanal. Complementariamente, el trabajo “Life Cycle Environmental Impacts and Energy Demand of Craft Mezcal in Mexico” [18], cuantifica mediante un análisis de ciclo de vida (ACV), los impactos ambientales y el consumo energético asociados a la producción artesanal. Complementariamente, el trabajo “Sostenibilidad y estrategia en agroecosistemas campesinos de los valles centrales de Oaxaca” [19] introduce en Índice Relativo de Sostenibilidad (IRS) como herramienta para evaluar tres agroecosistemas representativos.

Pese al carácter artesanal de la producción, se identificó formalización empresarial en micro y pequeña empresas, evidencias en el estudio de caso “Empresas rurales sustentables en la Sierra Sur del estado de Oaxaca” [20]. Esta investigación aplica indicadores de sustentabilidad al sistema maguey – mezcal, demostrando la viabilidad de modelos organizativos estructurados en comunidades productoras.

La revisión bibliográfica identificó contribuciones clave para la gestión ambiental del sector, particularmente en publicaciones de la revista Centro de Estudios en Desarrollo Sustentável (CEDS) que analizan la certificación e inocuidad en procesos productivos [21]. Estos trabajos enfatizan el rol de la denominación de origen como mecanismo de valorización comercial y ambiental, respaldado por análisis normativos de organismos reguladores. Paralelamente, el manual de manejo campesino de magueyes mezcaleros silvestres [22] del grupo de estudios ambientales AC constituyendo un referente técnico – legal para la sustentabilidad integral del proceso desde la extracción de materia prima hasta el envasado final.

El marco regulatorio se enriquece con la Ley para el manejo sustentable del agave del estado de hidalgo [23], cuyos principios de conservación y ordenamiento territorial presente sinergias potenciales con la realidad productiva Oaxaqueña. Esta convergencia normativa se evidencia en el Proyecto de Ley de Desarrollo Sustentable de Maguey – Mezcal, que propone un modelo regulatorio integral que abarca [24]:

- Gestión sostenible de recursos fitogenéticos
- Capacidad técnica de actores productivos
- Establecimiento de protocolos ambientales para procesos industriales

Por otra parte, diversos autores han realizado investigaciones experimentales con algunos de los subproductos contaminantes derivados del proceso de producción artesanal de mezcal, los cuales carecen de un manejo orientado a la valorización [25]. Entre estos productos destacan principalmente el bagazo, cuyas fibras, al igual que otras fibras vegetales, son materiales lignocelulósicos con potencial técnico, económico y ecológico. Por lo tanto, podrían aprovecharse en diferentes industrias [26]. En este sentido, en [27] se recolectaron muestras de bagazo y fibras desechadas provenientes de la producción de bebidas alcohólicas, con el propósito de evaluar su reutilización o la generación de subproductos, tales como la elaboración de adobes [9], compostas [28] o biogás [25]. En el artículo [29] se emplean las tecnologías emergentes (calentamiento óhmico) en la composición bioactiva del bagazo, para aumentar los compuestos bioactivos y reducir la recalcitrante mejorado su uso como ingrediente funcional.

En caso de las vinazas, se han estudiado sus propiedades como combustible [30], una de las alternativas propuestas en [31] es mediante el aprovechamiento en un proceso de fermentación oscura para obtener biogás rico en biohidrógeno, biometano y ácidos grasos volátiles o su potencial efecto biofertilizante bajo condiciones controladas [32], además, en el caso de [33] se plantea una mejora en la concentración de metano en el biogás, produciéndolo mediante la codigestión de residuos alimentarios y la vinaza. De igual forma, son escasos los artículos que abordan el primer subproducto del proceso, es decir, las hojas o pencas de agave, las cuales permanecen en el campo tras la cosechar las piñas [34]. Así pues, la literatura evidencia varios aspectos del proceso de producción que necesitan una mejora sustancial, incluyendo la reducción de la dependencia del agave silvestre, la adopción de fuentes de energía más sostenibles y la disminución del uso de agua o la implementación de procesos de reciclaje [35]. Así como, los efectos negativos que ocasiona el depósito de los residuos generados en la producción de mezcal en el suelo [34].

1.7 Organización del documento

Capítulo I. El primer capítulo presenta una descripción del contenido del trabajo e información relevante, antecedentes, problemática, objetivos, y estado del arte.

Capítulo II. En el segundo capítulo se sitúa el marco conceptual, que complementa la información para una mejor comprensión del tema, además se amplía el pilar ambiental en relación de la producción de mezcal.

Capítulo III. Durante este capítulo, se muestra el desarrollo de cada uno de los puntos de la metodología establecida.

Capítulo IV. En el capítulo cuarto se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, desde un contexto general, hasta las alternativas e indicadores propuestos.

Capítulo V. Para finalizar en el capítulo quinto, se localizan las conclusiones de la investigación, y la propuesta de enfoque para trabajos futuros o extensión del tema presentado.

CAPÍTULO II

Información y conceptos clave

En este capítulo se desglosan puntos específicos que permitan contextualizar la terminología utilizada durante el desarrollo de la presente investigación, con el objetivo de comprender la terminología a la que se hace referencia, además, se amplía la información existente sobre las cuestiones ambientales que envuelven al proceso productivo de mezcal.

2.1 Marco teórico

2.1.1 Agave

México es el país con mayor diversidad de agave comprende alrededor de 210 especies, de las cuales alrededor de 159 se ubican en México, con 119 especies endémicas. El agave es un género de planta suculentas, pertenecientes a la familia Agavoideae, originario de regiones áridas y semiáridas de México. Conocida también como Pita o Maguey, se caracteriza por formar una roseta basal de hojas gruesas y fibrosas, generalmente con espinas en los márgenes, las hojas pueden variar en forma, textura y tonalidades según la especie. Son plantas monocárpicas, ya que florecen una sola vez en su ciclo de vida, estas pueden reproducirse sexual y asexualmente utilizando semillas o tallos vegetativos (retoños) respectivamente [36].

En Oaxaca se distribuyen de forma natural 35 especies de agave, cifra que representa el 22% del total nacional, ubicando a Oaxaca como el estado con mayor diversidad de agave en México; se estima que para la elaboración de bebidas destiladas (Mezcal) se emplean alrededor de 28 especies a nivel nacional, 14 se utilizan en términos comerciales y 6 se emplean ocasionalmente [10], [37], [38].

2.1.2 Destilación

El proceso de calentar un líquido hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y posterior condensación para recuperación líquida de los componentes es conocido como destilación, cuyo objetivo principal es separar una mezcla de varios componentes

aprovechando sus distintas volatilidades, es decir purifica líquidos, ya que permite realizar una separación de mezclas en fase líquida en sus componentes individuales. Dicho de otro modo, se trata de un proceso de separación líquido-líquido que aprovecha el punto de ebullición de los elementos, mediante un intercambio de calor que permite retornarlo a su estado líquido utilizando sus propiedades termodinámicas [39], [40].

2.1.3 Indicador de sostenibilidad

La forma más sencilla de simplificar información compleja y facilitar la toma de decisiones, es mediante la implementación de indicadores, estos permiten medir, evaluar y comunicar información relevante del estado o evolución del sistema o fenómeno específico a tratar, ya sea de forma cualitativa o cuantitativa. Por ejemplo, un indicador puede reflejar tendencias o coincidencias que no son inmediatamente evidentes, proporcionando pistas claras sobre procesos o estados significativos [40], [41]. Por lo que, en este contexto, un indicador de sostenibilidad permitirá evaluar y medir el desempeño de una organización o sistema en función de las dimensiones económica, social y ambiental que son los pilares de la sostenibilidad, dicho de otra forma, el indicador de sostenibilidad permite observar que tan relacionada y en correcto seguimiento se encuentra una institución.

2.1.4 Mezcal.

Desde tiempos prehispánicos en México se han elaborado diversas bebidas alcohólicas pertenecientes a la cultura, una de las bebidas espirituosas más representativas es el mezcal. La palabra mezcal tiene su origen en vocablos de la lengua Náhuatl, es un líquido de olor y sabor original, incoloro o ligeramente amarillento cuando es reposado o añejado, originario de México, elaborado durante siglos arraigándose en la cultura y tradiciones del país [1], [5], [42].

Esta bebida se obtiene mediante los procesos de destilación y rectificación de mostos elaborados a partir de los azúcares extraídos de las cabezas maduras de diversas especies de agave. Estos azúcares, previamente hidrolizados o cocidos, son sometidos a un proceso de fermentación antes de su destilación, lo que da como resultado el producto final característico [3], [43].

2.1.6 Normas relacionadas a la producción de mezcal.

Dentro del marco normativo orientado a la sostenibilidad en los procesos productivos, existen diversas certificaciones y reconocimiento que promuevan prácticas responsables, integradas en el ámbito de la responsabilidad social empresarial. En el caso específico de la producción de mezcal, las normas aplicables se detallan en la **Tabla 1**, las cuales regulan aspectos técnicos, ambientales y sociales para garantizar un desarrollo sostenible y calidad del producto conforme a la legislación vigente.

Tabla 1. Normas Vigentes aplicables a la producción de mezcal [43].

NOM-070-SCFI-2016	Bebidas alcohólicas – mezcal -especificaciones.
NOM-030-SCFI-2006	Información comercial de cantidad en la etiqueta-Especificaciones, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de noviembre de 2006 [23].
NOM-142-SSA1/SCFI-2014	Bebidas alcohólicas. Especificaciones sanitarias. Etiquetado sanitario y comercial, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de marzo de 2015.
NOM-251-SSA1-2009	Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de marzo de 2010.
5. NMX-V-004-NORMEX-2013	Bebidas Alcohólicas- Determinación de furfural-Métodos de Ensayo (Prueba). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de enero de 2014.
NMX-V-005-NORMEX-2013	Bebidas alcohólicas-Determinación de aldehídos, ésteres, metanol y alcoholes superiores-Métodos de ensayo (prueba). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de enero de 2014.

NMX-V-013-NORMEX-2013	Bebidas alcohólicas-Determinación del contenido alcohólico (por ciento de alcohol en volumen a 293 K) (20°C) (% Alc. Vol.)-Métodos de ensayo (prueba). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de enero de 2014.
NMX-V-017-NORMEX-2014	Bebidas alcohólicas-Determinación de extracto seco y cenizas-Métodos de ensayo (prueba). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de marzo de 2015.
NMX-V-050-NORMEX-2010	Bebidas Alcohólicas- Determinación de metales como cobre (Cu), plomo (Pb), arsénico (As), zinc (Zn), hierro (Fe), calcio (Ca), Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), por absorción atómica- Métodos de Ensayo (Prueba). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de febrero de 2011. *
NMX-V-027-NORMEX-2009,	Bebidas alcohólicas-Determinación de anhídrido sulfuroso, dióxido de azufre (SO ₂) libre y total-Métodos de ensayo (Prueba).
NOM-127-SSA1-1994	Salud Ambiental. Agua Para Uso Y Consumo Humano. Límites Permisibles De Calidad Y Tratamientos A Que Debe Someterse El Agua Para Su Potabilización.
NMX-V-025-NORMEX-2010	Bebidas Alcohólicas-Determinación de adición de alcoholes o azúcares provenientes de caña, sorgo o maíz a bebidas alcohólicas provenientes de uva, manzana o pera mediante la relación isotópica de carbono 13 (d (13)CVPDB), Determinación del origen de CO ₂ en bebidas alcohólicas gaseosas mediante la relación isotópica de carbono 13 (d (13)CVPDB), Determinación de adición de agua en los

	vinos mediante la relación isotópica del oxígeno 18 (d18OVSMOW), por espectrometría de masas de isótopos estables - Métodos de prueba.
NOM-012-SEMARNAT-1996	Que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento de leña para uso doméstico.
NOM-059-SEMARNAT-2010	Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión, o cambio-Lista de especies en riesgo. Fecha de Publicación en el Diario Oficial de la Federación el 30 de diciembre de 2010.
NOM-152-SEMARNAT-2006	Que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. Fecha de publicación en el Diario Oficial de la Federación el 17 de octubre de 2008.
NOM-005-SEMARNAT-2012	Que establece los criterios para realizar el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales no maderables existentes en los ecosistemas forestales; bosques de clima templado frío, selvas y zonas áridas y semiáridas-especificaciones técnicas.

Desde la implementación inicial hasta la producción final, los procesos productivos están regulados por diversas normativas. La producción de mezcal no es la excepción; además de las normas que regulan la gestión ambiental, la SEMARNAT², a través de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), regula las actividades que involucran el uso de recursos naturales, definidos como bienes y servicios proporcionados por la naturaleza en su estado

² Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

original, los cuales pueden aprovecharse para satisfacer las necesidades humanas [44]. En la **Tabla 2** se presentan algunas leyes complementarias que refuerzan las normas mencionadas, orientados a la protección ambiental.

Tabla 2. *Leyes aplicables para la sustentabilidad [45].*

La Ley de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS)	- Artículo 97, del Aprovechamiento de los Recursos Naturales No Maderables - Artículo 100, del Aprovechamiento de los Recursos Naturales No Maderables - Artículo 26, 27 y 28 del reglamento de la LGDFS
La Ley General de Vida Silvestre (LGVS)	- Artículo 24, sobre los Conocimientos, Innovaciones y Prácticas de las Comunidades Rurales - Artículo 93 sobre el Aprovechamiento para fines de Subsistencia.
La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)	
Ley de Gestión ambiental [8]	
La Ley General de Vida Silvestre (LGVS)	
La Ley Agraria	
La Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS)	
Ley de fomento y protección sustentable de la producción del maguey – mezcal [46]	

2.1.7 Objetivo De Desarrollo Sostenible

La agenda 2030 es un compromiso universal adquirido tanto por países desarrollados como en desarrollo, en el marco de una alianza mundial reforzada, que toma en cuenta los medios de implementación para realizar el cambio y la prevención de desastres por eventos naturales

extremos, así como la mitigación y adaptación al cambio climático [22]. Los 17 Objetivos de desarrollo sostenible son el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos.



El objetivo No. 12 pretende garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, algo fundamental para sostener los medios de subsistencia de las generaciones actuales y futuras. Para reducir nuestros niveles de consumo, una de las principales medidas que debemos adoptar es sustituir los sistemas de suministro energético por otros sostenibles [47]. En cualquier proceso productivo que se utilicen recursos naturales y su producción se lleva altos niveles representa un punto de partida para la escases, aunado a ello, no se cuenta con la cultura de cuidar lo que tanto se requiere. En el caso específico de la producción artesanal de mezcal muestra incrementos notables en la producción en los últimos años por ende el consumo de materia prima se incrementa a la par, por lo que, el presente trabajo de investigación toma en consideración este Objetivo de Desarrollo Sostenible.

2.1.8 Proceso de producción de mezcal artesanal

La producción de mezcal se categoriza en tres categorías establecidas en la NOM-070-SCFI-2016, "Bebidas alcohólicas-Mezcal Especificaciones" [43], en función de las herramientas utilizadas durante el proceso productivo, como se ilustra en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Categorización de la producción de mezcal.

Proceso	Categorías		
	Mezcal (Industrial)	Ancestral	Artesanal
<i>Cocción</i>	Hornos de pozo, mampostería o autoclave	Hornos de pozo	Hornos de pozo o elevados de mampostería
<i>Molienda</i>	Tahona, molino chileno o egipcio, trapiche, desgarradora, tren de molinos o difusor	Mazo, tahona, molino chileno o egipcio	Mazo, tahona, molino chileno o egipcio, trapiche o desgarradora
<i>Fermentación</i>	Recipientes de madera, piletas de mampostería o tanques de acero inoxidable	Oquedades en piedra, suelo o tronco, piletas de mampostería, recipientes de madera o barro	Oquedades en piedra, suelo o tronco, piletas de mampostería, recipientes de madera o barro

<i>Destilación</i>	Alambique, destiladores continuos o columnas de cobre o acero inoxidable	Olla de barro y montera de barro o madera	Alambique de caldera de cobre u olla de barro, madera, cobre o acero inoxidable
--------------------	--	---	---

De acuerdo con la **Tabla 3**, cada categoría muestra las herramientas utilizadas para la producción de mezcal de acuerdo con la categoría de pertenencia, para fines de este trabajo de investigación se precisa exclusivamente la producción artesanal.

El mezcal es una bebida alcohólica tradicional de México, elaborada principalmente mediante procesos artesanales, como se observa en la **Figura 1**. El proceso de producción incluye las siguientes etapas.

1. Selección y recolección de agave: Se eligen plantas maduras de agave cuya concentración de azúcares ha alcanzado el nivel óptimo tras varios años de crecimiento [48].
2. Jima del agave: En esta fase, las plantas son cortadas de su base y se les retiran la mayoría de las hojas mediante el proceso de jimado, obteniendo así las piñas de agave [49].
3. Cocción del agave: Las piñas de agave se cuecen en hornos cónicos excavados en la tierra, con base de piedra o cemento, lo que contribuye al desarrollo de compuestos aromáticos característicos del mezcal [43], [49].
4. Molienda: El agave cocido se tritura en una tahona circular de piedra o cemento, generalmente accionada por tracción animal, para obtener una mezcla de jugos y fibras [48].
5. Fermentación; La mezcla obtenida se coloca en tinajas de madera abiertas, donde las levaduras silvestres llevan a cabo la fermentación, proceso esencial para el desarrollo del perfil sensorial del mezcal [43], [49].
6. Destilación: El mosto fermentado se somete a una o dos destilaciones en alambique de cobre, obteniéndose así el destilado final de mezcal [48].
7. Envasado: Finalmente, el mezcal se homogeniza y estabiliza antes de ser envasado, asegurando la estandarización del producto conforme a la normativa vigente [38],[43].

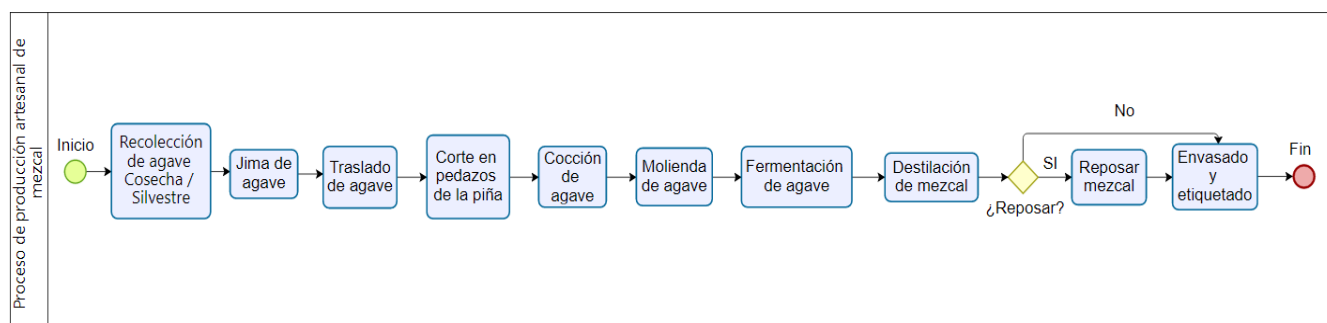


Figura 1. Modelado BPMN del proceso de producción artesanal de mezcal

2.1.9 Tipos de agave más utilizados para la producción de mezcal

El género Agave es un habitante típico de los ecosistemas áridos y semiáridos de México, y posee un alto grado de endemismo. Aproximadamente 75 % de las especies de Agave son 4 endémicas, y algunas de ellas tienen relevancia antropogénica desde la época prehispánica [50]. En la **Tabla 4** se muestran las especies de agave más utilizadas para elaborar mezcal según informes presentados por Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM).

Según la **Tabla 4**. La especie *A. Angustifolia* es la principal empleada para la producción de mezcal, del 100 % de la producción de nacional se cubre alrededor del 86 % con esta especie de agave, especialmente en Oaxaca, esto, debido a su alta adaptabilidad, ciclo de maduración relativamente corto, facilidad de propagación y su rendimiento de azúcares. Otras especies relevantes por su valor en la producción de mezcales de alta calidad y diversidad genética incluye *A. Potatorum*, *A. Cupeatra*, *A. Salmiana*. Estas especies, en su mayoría silvestres, son preferidas por sus perfiles organolépticos únicos y su contribución a la diversidad sensorial del mezcal [50], [51], [52].

Tabla 4. Agave utilizado para la producción de mezcal

<i>Agave</i>	<i>Nombre común</i>	<i>2021 (%)</i>	<i>2022 (%)</i>	<i>2023 (%)</i>
<i>A. Angustifolia</i>	Espadín	88.11	81.02	86.31
<i>A. Duranguensis</i>	Cenizo	2.23	1.17	1.04
<i>A. Salmiana</i>	Verde	1.90	1.27	0.98
<i>A. Cupeatra</i>	Papalote	1.29	1.5	0.60
<i>A. Potatorum</i>	Tobalá	1.2	1.98	2.42
<i>A. Karwinskii</i>	Cuishe	-	1.43	1.35
	Otros	5.27	11.63	7.3

2.1.10 Sostenibilidad

El desarrollo sostenible satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Contiene dos conceptos clave: el concepto de "necesidades", en particular las necesidades esenciales de los pobres del mundo, y la idea de las limitaciones impuestas por el estado de la tecnología y la organización social a la capacidad del medio ambiente para satisfacer las necesidades presentes y futuras [53]. La sostenibilidad contempla tres pilares fundamentales, económico, social y ambiental, a su vez, es posible hacer referencia de manera individual sin perder la esencia general de lo que conlleva la sostenibilidad, abordándolos como:

Sostenibilidad ambiental: se refiere a la gestión eficiente y responsable de los recursos naturales durante la actividad productiva, con el objetivo de preservar su disponibilidad para las necesidades de generaciones futuras. La sostenibilidad ecológica/ambiental implica un uso consiente y planificado de los recursos naturales, orientado a mantener la salud e integridad de los ecosistema, garantizando el mínimo consumo de capital no renovable y fomentando la diversificar el sistema hacia fuentes renovables, lo que contribuye a disminuir la degradación ambiental [54], [55], [56].

Sostenibilidad económica: implica la implementación de prácticas productivas que sean rentables desde el punto de vista financiero, pero que también consideren su impacto social y ambiental, asegurando así una operación equilibrada y responsable al mismo tiempo [54].

Sostenibilidad social: La sostenibilidad social busca fortalecer la cohesión y estabilidad de las poblaciones, facilitando su desarrollo y mejorando la calidad de vida de sus integrantes, de manera que se garantice un bienestar duradero y equitativo [54].

De manera general, el concepto sostenibilidad surge como respuesta a las limitaciones del modelo económico tradicional, centrado en la maximización de la producción, el consumo y la explotación indiscriminada de recursos naturales. Este enfoque promueve la gestión racional de los recursos, asegurando su regeneración y la mitigación de impactos ambientales para garantizar su disponibilidad a las generaciones futuras. Además, la sostenibilidad integral requiere la implementación de políticas económicas y sociales orientadas a las zonas más vulnerables, especialmente rurales, con el objetivo de promover el equilibrio ecológico

y el bienestar socioeconómico, facilitando así modos de vida sostenibles adaptados a las necesidades [57].

2.1.11 Teoría de modelado

Los modelos pueden adoptar diversas formas, desde descripciones conceptuales y representaciones gráficas hasta construcciones físicas o formulaciones matemáticas, dependiendo de los objetivos y el contexto de aplicación. Su propósito principal es servir como herramienta para el estudio, la predicción o anticipando escenarios futuros [58], [59], [60]. Un modelo es una representación simplificada de la realidad, diseñada para facilitar la comprensión, el análisis y el estudio de hechos, fenómenos, procesos o sistemas complejos.

En la literatura, los modelos se clasifican comúnmente en matemáticos y no matemáticos; estos últimos incluyen modelos conceptuales, materiales y descriptivos, entre otros [61], como se muestra en la **Figura 2**.

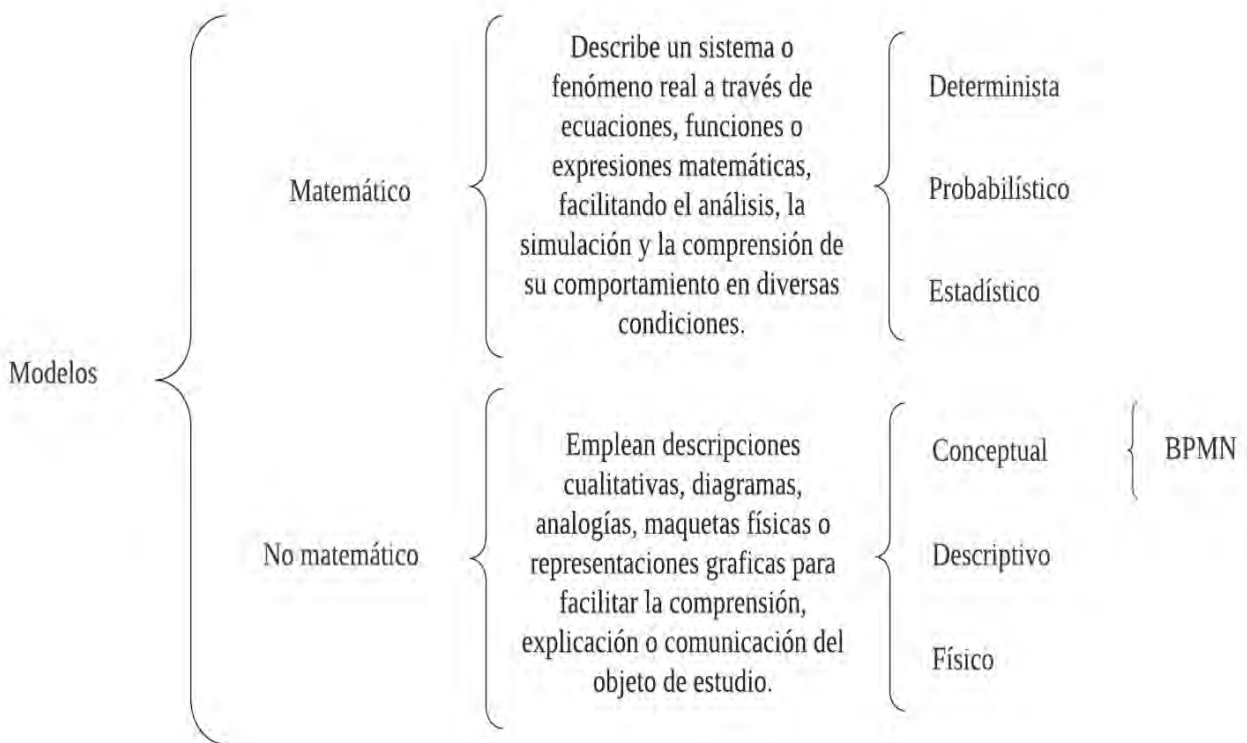


Figura 2. Modelo matemático y no matemático.

Para el desarrollo en el presente trabajo se optó por la aplicación del modelo conceptual, que, como se muestra en la **Figura 2**, pertenece al grupo de modelos no matemáticos. El objetivo principal de los modelos conceptuales no es cuantificar las relaciones entre sus componentes, si no, identificar y describir como se interrelacionan los elementos relevantes para el problema en estudio. Estos son representaciones predominantemente cualitativas diseñadas para explicar o caracterizar aspectos específicos de la realidad mediante ideas, palabras o esquemas simples. Aunque comúnmente se clasifican como modelos no matemáticos, algunos modelos conceptuales pueden formalizarse rigurosamente mediante ecuaciones, transformando así en modelos matemáticos. Independientemente de su forma todos los modelos conceptuales comparten la características de ser representaciones simplificadas e idealizadas, que buscan ser lo más precisas y completas posible dentro del marco del conocimiento científico vigente hasta el momento de su formulación.

2.1.5 Modelos para el análisis de la sostenibilidad

Existen variadas opciones para llevar a cabo la presentación o análisis de la sostenibilidad relacionada a un proceso productivo Como se muestra en la **Figura 3**. Para fines de la investigación se consultaron cuatro modelos y eventualmente se optó por seleccionar la alternativa más viable, además, la presentación en Business Process Model and Notation BPMN resultaba ser una representación conceptual del proceso previo a su automatización, que es la ventaja de desarrollo que ofrece dicho modelo, aunque en la investigación se mantiene en primera fase, como presentación conceptual.

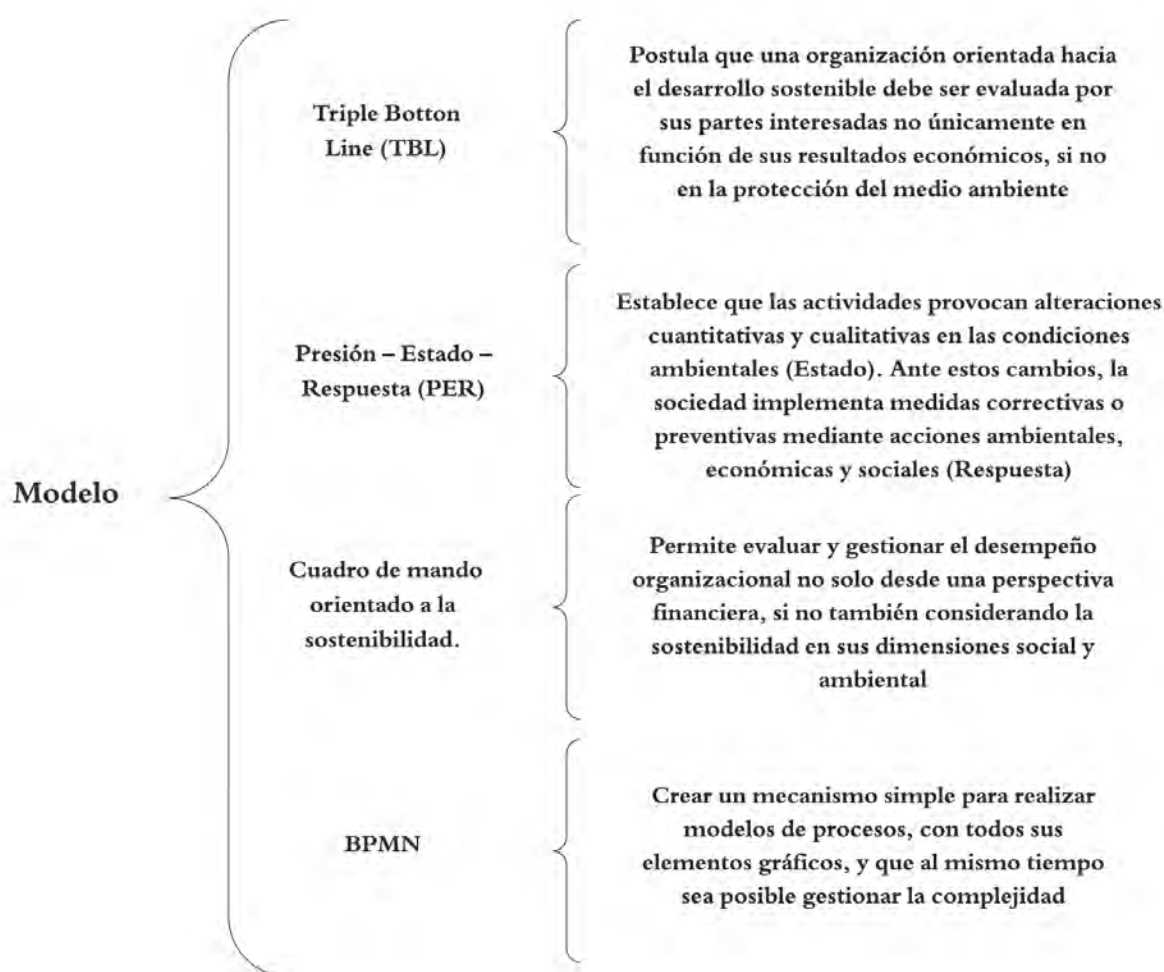


Figura 3. Modelo para el análisis de la sostenibilidad [62] .

La Figura 3, aborda breves descripciones de la función u objetivo de los modelos propuestos. Con base en ello el modelo conceptual aceptado para este trabajo fue el modelo de procesos de negocios BPMN. Es una notación aceptada a nivel mundial, estándar en la industria, para el modelado de procesos, a través de la cual se expresan los procesos en un diagrama agrupando la planificación y gestión del flujo de trabajo, por otra parte, desde un enfoque ambiental permite reducir el impacto ambiental y contribuir en la sostenibilidad ambiental. La función del BPMN es crear un mecanismo simple para realizar modelos de procesos, con todos sus elementos gráficos, y que al mismo tiempo sea posible gestionar la complejidad [63], [64], [65] .

2.2 Panorama de la dimensión ambiental en la producción de mezcal.

En la cultura mexicana el uso de agave no inició particularmente con la elaboración de bebidas alcohólicas, según diversas investigaciones, este se utilizó para crear diversos productos de uso medicinal o como alimento, no fue hasta, la llegada de diversas culturas durante la conquista que el método de producción de introdujo. El agave comenzó a utilizarse además para elaborar vino, agua miel, pulque, y lo que hoy conocemos como mezcal, sin embargo, esta práctica de elaboración tuvo restricciones y se consideraba prohibida y solo se permitía consumir a altos mandos de ese momento, por otra parte, ese conocimiento se compartió hasta las generaciones actuales en diversas partes de país. Debido a la extensión de geográfica que tuvo el conocimiento sobre el proceso de elaboración de mezcal, varios estados solicitaron el respaldo de la Denominación de Origen (DOM), esta se otorga como garantía de que el producto es originario de una región del país, entre estos, Oaxaca es principal productor de mezcal, principalmente en la producción artesanal [14], [66].

Debido a que la producción artesanal pretende que se utilicen el conocimiento empírico obtenido por generaciones, aun se utiliza herramienta rudimentaria que podrían resultar ambientalmente ineficientes. Debido a la poca información disponible para los productores a cerca de las posibles consecuencias o efectos adversos provenientes de la producción, no se habían implementado medidas preventivas para reducir el impacto de estas, se han instaurado modificaciones por parte de algunas empresas, sin embargo, no todas siguen cubriendo la categoría artesanal, debido a las modificaciones en la maquinaria o el proceso en si, por tanto, como lo notifica la NOM - 070, Bebidas alcohólicas – Mezcal – Especificaciones cambia su categoría.

Esta producción genera grandes cantidades de residuos sólidos y contaminación del aire por la quema de recursos madera y en otros casos por la quema de bagazo, tras la popularidad obtenida en los últimos años la producción ha incrementado y se plantea un panorama poco favorable como en su momento se presentó en la producción de tequila, es por ellos que algunas investigaciones se han centrado en las composiciones químicas, reacciones al mediante y cantidades de los desechos que la producción genera.

Tomando como referencia los residuos de la producción de bebidas alcohólicas como el tequila que cuenta con más referencias de aprovechamiento de sus residuos, se presentaron

en años recientes la posible transformación de estos para un nuevo uso o en su mayoría se propone la transformación de estos para la elaboración de combustibles, incluso se ha planteado la posibilidad de generar hidrogeno [30], [67], y la opciones de beneficiar al suelo mediante la aplicación de estos en medidas controladas [32], [68]. Por otra parte, el bagazo presenta eficiencia de bioconversión para generar biogás y bioetanol, aunque no sean procesos fáciles de llevar a cabo para pequeños productores, son posibilidades de solución.

En consecuencia, el resultado de las actividades del proceso se ha estudiado desde diferentes perspectiva y con soluciones optimas, pero a mayor escala, por lo que, soluciones viables para pequeños productores se estudian durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Capítulo III

Desarrollo de la metodología

Este capítulo muestra el desarrollo de la metodología de solución propuesta, misma que se estructura en seis fases, partiendo del diseño de la investigación donde se define y estructura el modelo utilizado, se describe la población donde se lleva a cabo la investigación y la recopilación y análisis de la información obtenida para finalizar con las conclusiones.

3.1 Metodología de investigación

La metodología utilizada en este trabajo se estructuró en seis fases, orientadas a la recolección y el estudio de la información relevante. Dichas etapas se ilustran en la **Figura 4**

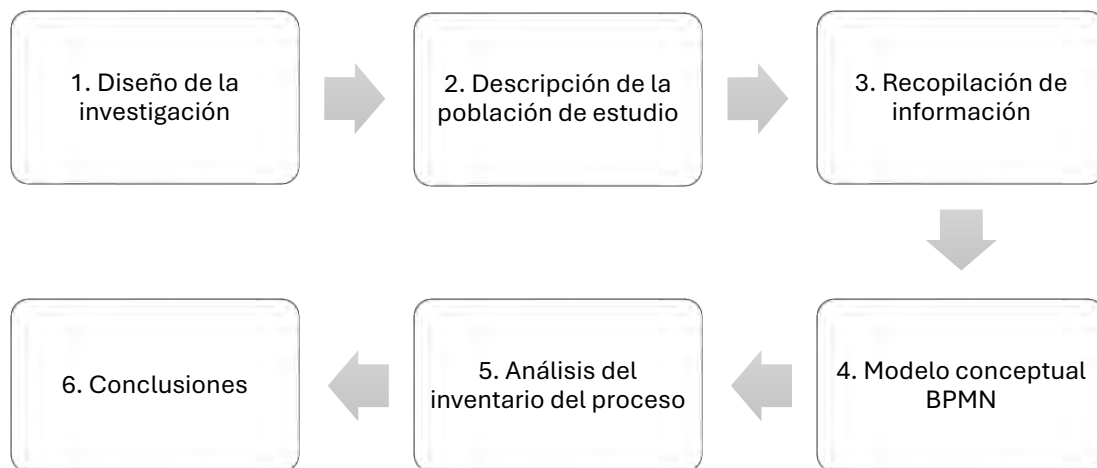


Figura 4. Metodología de investigación.

El desarrollo de cada una de las etapas mostradas en **Figura 4**, se abordarán en los subtemas correspondientes, conforme a la secuencia establecida en la metodología.

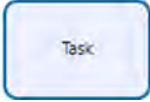
3.1.1 Diseño de la investigación

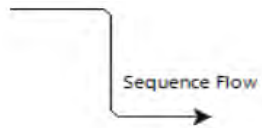
En BPMN, los “Procesos de Negocio” involucran la captura de una secuencia ordenada de las actividades e información de apoyo. Para el modelado de BPMN en la herramienta Bizagi se cuenta con un listado de elemento que te permiten puntualizar cada etapa del proceso. Un elemento clave de BPMN es la elección de formas e iconos utilizados para los elementos gráficos identificados en esta especificación. La intención es crear un lenguaje visual estándar

que todos los modeladores de procesos reconozcan y entiendan. Una implementación que cree y muestre Diagramas de Proceso BPMN deberá usar los elementos gráficos, formas y marcadores ilustrados en esta especificación [69].

Los elementos que se describen en la **Tabla 5** son los utilizados específicamente para el modelado de este trabajo de investigación.

Tabla 5. Elementos para modelado en BPMN.

Elemento	Descripción	Notación
<i>Un evento es algo que sucede durante el curso del proceso, afectando el flujo y generando un resultado.</i>		
Evento de inicio simple	Indica donde se inicia un proceso	 Start Event
Finalización simple	Indica que el flujo finaliza	 End
<i>Las actividades representan trabajos o tareas llevadas a cabo por miembros de la organización o en este caso determinan de manera general el punto a abordar.</i>		
Tarea	Se utiliza cuando el trabajo en proceso no puede desglosarse a un nivel más bajo de detalle	
<i>Un subproceso es una actividad compuesta que se incluye dentro de un proceso. Compuesta significa que puede ser desglosada a niveles más bajos, esto es, que incluye figuras y elementos dentro de ella.</i>		
Subproceso	Actividad cuyos detalles internos se han modelado utilizando actividades, compuertas, eventos y flujos de secuencia.	 Subprocess
Subproceso reusable	Identifica un punto en el flujo donde se invoca en proceso predefinido.	 Reusable Subprocess
<i>Las compuertas se utilizan para controlar la divergencia y convergencia de flujos de secuencia. Determinan ramificaciones, bifurcaciones, combinaciones y uniones en el proceso. El término “Compuerta” implica que hay un mecanismo que permite o limita el paso a través de la misma.</i>		

Compuerta exclusiva	De divergencia: Se utiliza para crear caminos alternativos dentro del proceso, pero solo uno se selecciona. De convergencia: Se utiliza para unir caminos alternativos.	
Contenedor (Pool)	Un pool procesos simples (contiene flujos de secuencia dentro de las actividades). Un proceso está completamente contenido dentro de un contenedor. Siempre existe por lo menos un contenedor.	
Flujo de Secuencia	Un flujo de secuencia es utilizado para mostrar el orden en el que las actividades se ejecutarán dentro del proceso.	
Flujo de Mensaje	Se utiliza para mostrar el flujo de mensajes entre dos entidades que están preparadas para enviarlos y recibirlos.	

Los elementos utilizados para la construcción de modelos en BPMN comprenden una amplia variedad de componentes gráficos que permiten representar procesos de manera precisa y estandarizada. No obstante, para los propósitos del presente trabajo, se emplean los elementos presentados en la **Tabla 5**.

3.1.2 Descripción de la población de estudio

- Lugar y tamaño de muestra.

Oaxaca de Juárez es la capital del estado de Oaxaca, México, y es conocida como la cuna del Mezcal. Es un centro cultural y turístico importante, conocido por su rica herencia indígena

y colonial. Valles Centrales se encuentra en la porción central del estado conocido como la región del mezcal, principalmente en los distritos de Sola de Vega, Miahuatlán, Yautepec, Tlacolula, Ocotlán, Ejutla y Zimatlán. Predominan climas semiáridos y semicálidos secos, con suelos volcánicos y escasa filtración de agua. Esto favorece la concentración de azúcares en los agaves [8].

En cuanto a la geografía de suelos de la región valles centrales Oaxaca. El suelo constituye el soporte material y la fuente de alimentos para el desarrollo de los seres vivos que habitan. Es una mezcla variable de partículas minerales, material orgánico, agua y aire. Se origina debido a la desintegración física de las rocas subyacentes, en un proceso de erosión muy lento, disgregándose en pequeños fragmentos. Los cambios de temperatura y pH ayudan al desarrollo de este proceso dinámico, cuyo resultado final es la liberación de los diferentes nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas y otros organismos que habitan allí. Los residuos orgánicos generados por la actividad viviente se van mezclando con los componentes originales del suelo, incrementando el contenido orgánico de éste [70].

En el estado de Oaxaca dominan las topoformas de sierras y lomeríos, que en conjunto constituyen aproximadamente el 80% y, junto con las condiciones climáticas, han tenido influencia en el intemperismo de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, para que a partir de la formación de sedimentos se haya dado lugar a la génesis de suelos jóvenes (litosoles, rendzinas y regosoles) en primer lugar, a suelos con desarrollo moderado (feozems, cambisoles, castañozems) en segundo y, en menor extensión, a suelos maduros (acrisoles, luvisoles, nitosoles). La vegetación ha contribuido con la aportación de materia orgánica para la formación suelos como feozems, rendzinas, castañozems y algunas subunidades húmicas de acrisoles y cambisoles [71], [72].

De modo tal que Oaxaca siendo el principal productor de mezcal en México, con aproximadamente el 93 % de la producción nacional, es un punto de inflexión para llevar a cabo el presente trabajo de investigación; se aplicó el instrumento de recolección de información a 25 productores de mezcal artesanal de las distintas regiones de Valles centrales, durante la convención anual en Julio 2024 llevada a cabo en el centro del estado de Oaxaca.

3.1.3 Recopilación de información

Durante la investigación de campo, se empleó un instrumento semiestructurado de recolección de información en formato de entrevista, diseñado con el propósito de conocer los factores medioambientales que se ven alterados por el proceso de producción artesanal de mezcal en el estado de Oaxaca con enfoque en sostenibilidad ambiental, consta de nueve preguntas.

- 1) ¿Considera que se tiene cuidado del medio ambiente en el proceso de producción de mezcal?
- 2) ¿Cuáles son los principales recursos naturales empleados para la producción de mezcal?
- 3) ¿De qué manera se obtienen los recursos naturales utilizados en la producción de mezcal?
- 4) ¿Reutiliza alguno de los recursos usados? ¿Cuáles? ¿Cómo lo hace?
- 5) ¿Cuáles son los principales desechos que se generan por la producción de mezcal?
- 6) ¿Reutiliza los desechos generados durante el proceso?
- 7) ¿De qué forma aplican su uso para reutilización?
- 8) ¿Lleva un registro de las cantidades de residuos generados por la producción?
- 9) ¿Lleva un registro de las cantidades de recursos necesarios para el proceso?

Con base en las respuestas proporcionadas por veinticinco productores de mezcal artesanal del estado de Oaxaca, se recopiló información cualitativa y cuantitativa, incluye respuestas estructuradas y datos complementarios obtenidos en formato libre durante el encuentro de mezcaleros, celebrado en julio 2024.

Resulta conveniente conocer el panorama general desde la perspectiva de los productores respecto al medio ambiente y la concordancia con sus respuestas, por lo que se comenzó con un cuestionamiento inicial de carácter general, como se muestra en la **Figura 5**.

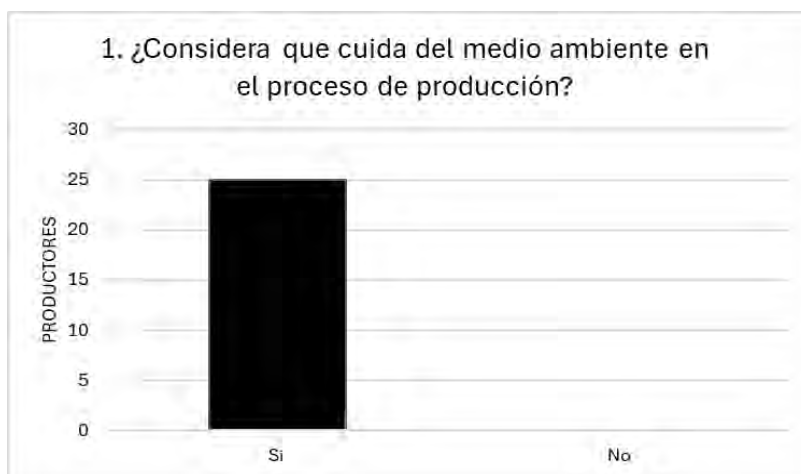


Figura 5. Consideración medioambiental.

En la **Figura 5**, la totalidad de los productores encuestados manifiesta que el proceso artesanal de elaboración de mezcal preserva el medio ambiente, sustentando esta afirmación en la naturaleza no industrializada del método artesanal, que evita la utilización de maquinaria que pueda generar impactos ambientales adversos. En la **Figura 6** se muestra la materia prima predominante empleada en la producción.



Figura 6. Materia prima predominante en la producción de mezcal

Como se muestra en la **Figura 6**, la materia prima empleada en el proceso de producción artesanal de mezcal está constituida principalmente por tres recursos naturales: agua, leña y agave. Es relevante identificar el origen y la forma de la extracción de estos recursos; por

ello, la **Figura 7** presenta las respuesta a la pregunta ¿De qué manera se obtienen los recursos naturales utilizados en la producción de mezcal?

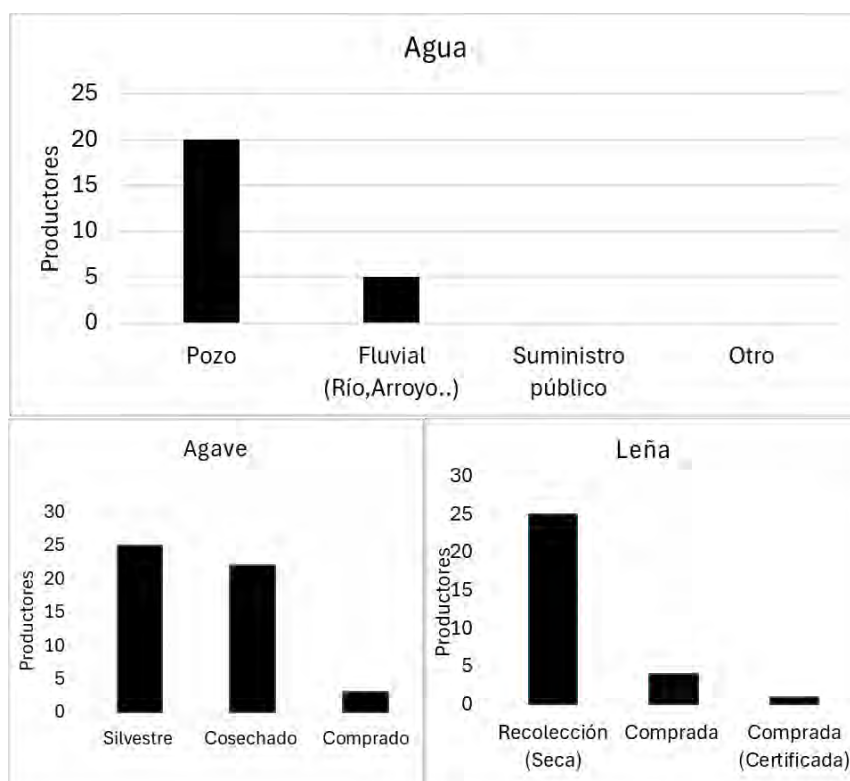


Figura 7. Origen de los recursos naturales en la producción de mezcal.

La **Figura 7** revela que la mayor parte del agua utilizada proviene de pozo, mientras que una proporción menor se obtiene de fuentes fluviales; el suministro público y otros no presentan participación significativa. En cuanto al agave, predomina el uso de plantas silvestres y cosechadas directamente por los productores, siendo minoritario el agave a terceros, aunque, esta es una variable que se ve influenciada además de otros factores el nivel de producción. Respecto a la leña, la recolección de material seco constituye la principal vía de abastecimiento, seguida por la compra, sin embargo, esta no presenta la condición de certificación sobre su adquisición y origen.

La **Figura 8** presenta los resultados sobre la reutilización de recursos en la producción artesanal de mezcal, así como, las modalidades empleadas para tal fin.

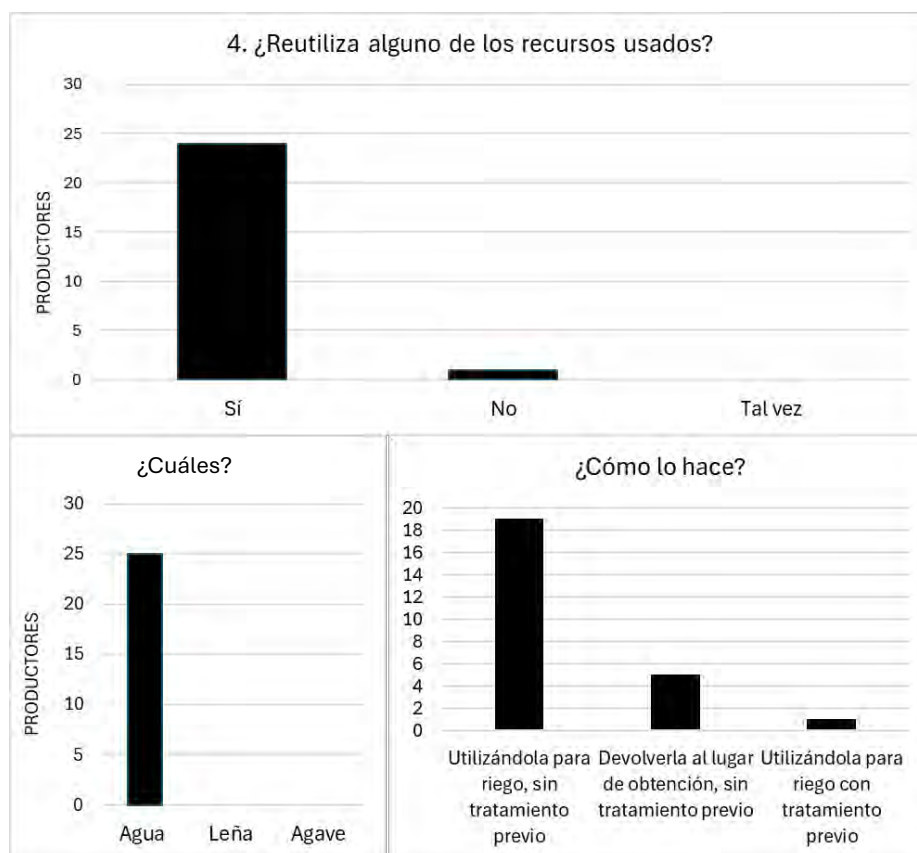


Figura 8. Reutilización de recursos empleados en la producción

De acuerdo con la **Figura 8**, la totalidad de los productores encuestados manifestaron reutilizar alguno de los recurso empleados en el proceso productivo. El recurso reutilizado de manera predominante es el agua, mientras que la leña y el agave no son comúnmente sujetos a prácticas de reutilización.

En cuanto a las estrategias de reutilización de agua, la mayoría de los productores la emplean para riego sin tratamiento previo, seguido de quienes optan por devolver al lugar de obtención sin el tratamiento, y en menor medida, quienes la utilizan para riego tras someterla a algún tipo de tratamiento. Estas prácticas, si bien reflejan un aprovechamiento del recurso hídrico, pueden resultar ambientalmente inadecuadas, ya que la reutilización sin tratamiento previo puede contribuir a la contaminación de suelos y cuerpos de agua, en lugar de representar un beneficio ambiental.

Por otra parte, la **Figura 9**, muestra los desechos obtenidos al finalizar el proceso de producción, lo que permite identificar áreas críticas para la gestión sostenible de residuos de la cadena productiva.



Figura 9. Desechos de la producción de mezcal

El Bagazo y la Vinaza constituyen los principales residuos generados durante la producción artesanal de mezcal, siendo identificados por los productores. Sin embargo, dentro de este panorama existen otros residuos que no se contemplan. La **Figura 10** evidencia que los productores implementan prácticas de reutilización de estos residuos y las distintas modalidades empleadas para el aprovechamiento de cada tipo de desecho.

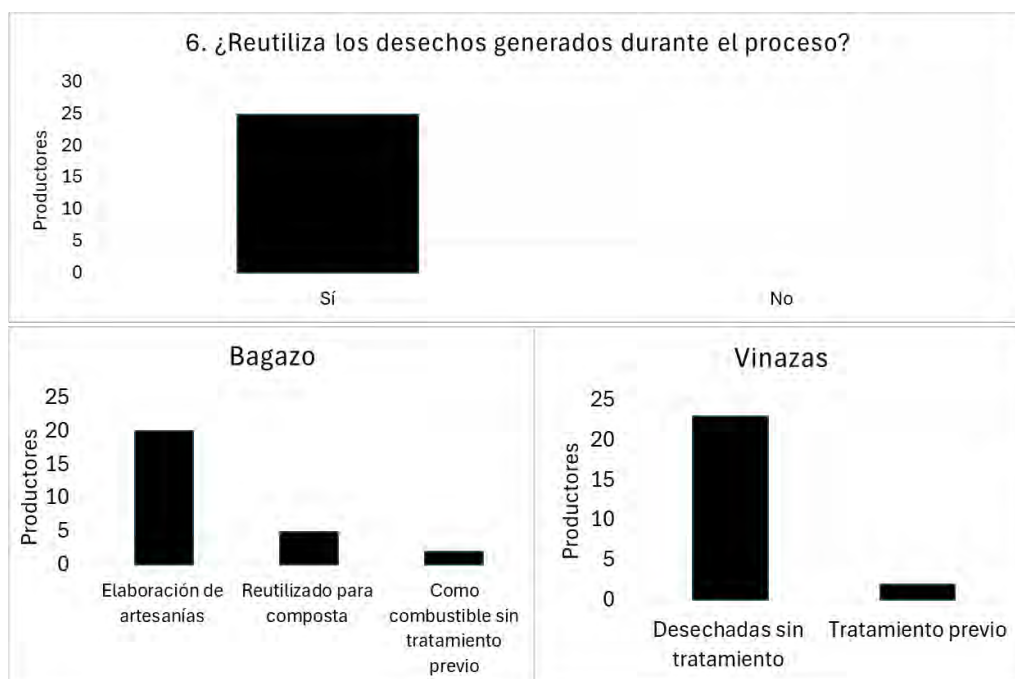


Figura 10. Prácticas de reutilización de los residuos

La producción de mezcal genera residuos que contiene diversos compuestos químicos, cuya gestión adecuada es indispensable antes de su reutilización, particularmente cuando estos subproductos se emplean como combustibles o se vierten directamente al suelo. Según se muestra en la **Figura 10**, las practicas actuales de reutilización implementadas no resultan ambientalmente eficientes, ya que no consideran los riesgos potenciales asociados a la gestión inadecuada de estos productos.

La cuantificación de los residuos generados, así como la determinación del porcentaje de aprovechamiento de la materia prima, constituyen elementos esenciales para evaluar el impacto ambiental del proceso productivo y fundamentar la propuesta de alternativas de manejo sostenible. En este contexto, la **Figura 11** y **Figura 12** evidencian en qué medida los productores registran y consideran estos parámetros en sus prácticas operativas, lo que resulta clave para el diseño e implementación de estrategias orientadas a la sostenibilidad del sector mezcalero.

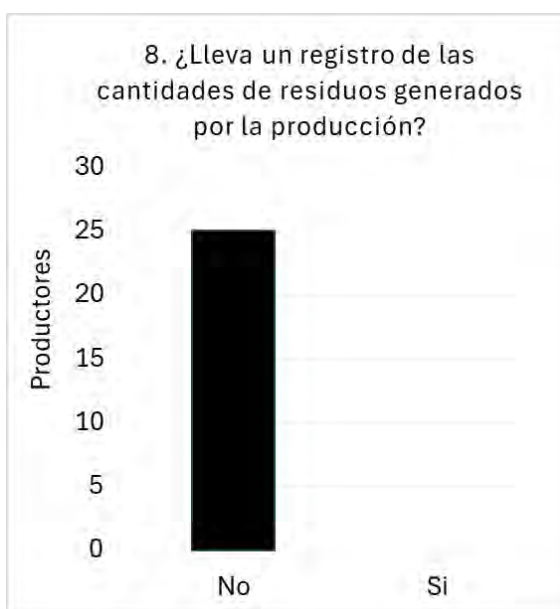


Figura 12. Registro de residuos generados



Figura 11. Registro de cantidades de materia prima utilizada

Tras analizar la información recabada a través del instrumento y con base en los resultados presentados en las **Figuras 11 y 12**, se concluye que los veinticinco productores artesanales de mezcal que conforman la muestra carecen de un conocimiento sistemático sobre el consumo de recursos, así como de la generación y disposición de residuos en sus procesos

productivos. Esta deficiencia representa una limitante significativa en términos de gestión y sostenibilidad ambiental, ya que el monitoreo y registro de estos parámetros es un requisito fundamental para identificar, evaluar y abordar de manera efectiva las acciones necesarias para mitigar la contaminación asociada a la producción artesanal de mezcal.

3.1.4 Modelo conceptual BPMN

La **Figura 13** presenta el modelo del proceso artesanal de mezcal, desarrollado mediante la herramienta Bizagi. Este modelo representa gráficamente la secuencia de actividades que componen la cadena productiva de mezcal, las etapas que se han analizado bajo el enfoque de sostenibilidad ambiental se identifican mediante la asignación de color azul.

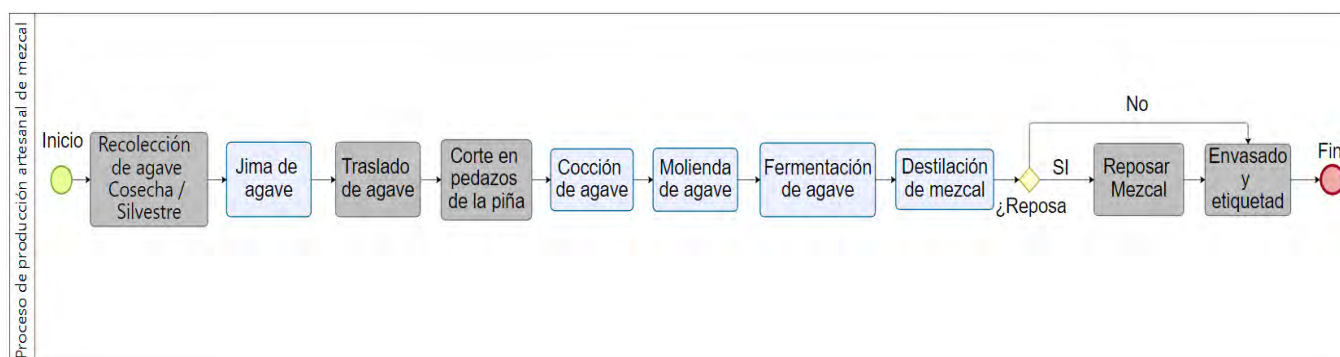


Figura 13. Proceso de producción artesanal de mezcal.

El proceso de producción de mezcal artesanal puede presentar ligeras variaciones en función de las técnicas empleadas por el maestro mezcalero, adaptándose a las particularidades de cada región y productor. No obstante, de manera general, el proceso debe constar de cinco etapas representativas y generalizadas del proceso mismas que se marcan en azul en la **Figura 13**, con las características que se especifican en la **Tabla 3** con base en la norma.

3.1.5 Análisis del inventario (Balance de materia y energía)

La recopilación de datos se realizó con base en el alcance definido a la elaboración de 1 Litro de mezcal, considerando los flujos de entrada y salida de cada paso del proceso tal como se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6. *Recopilación de información (entradas y salidas) del proceso.*

Proceso	Insumos principales	Productos / Residuos
<i>Recolección de agave</i>	Agave cosechado/silvestre	Piñas de agave
<i>Jima</i>	Agave cosechado/silvestre	Pencas de agave
<i>Cocción</i>	Piñas de agave, leña	Trozos de piña cocidos, emisiones (CO ₂ , Co)
<i>Molienda</i>	Trozos de piña cocida	Apelmazado de fibra de agave
<i>Fermentación</i>	Apelmazado de fibra de agave, agua.	Fibra de agave, mostos, bagazo
<i>Destilación</i>	Mostos, leña, agua	Cabeza, Cuerpo y Cola de mezcal, emisiones (CO ₂ , Co), vinaza
<i>Reposado / Envasado</i>	Mezcal, barrica	Mezcal

El análisis del inventario para la producción de mezcal artesanal se fundamenta en la identificación y cuantificación de los principales insumos, productos y residuos asociados a cada etapa del proceso productivo de acuerdo con los pasos ya especificados. El balance de materia y energía se establece considerando el consumos y la generaciones asociados a cada etapa del proceso, tomando como referencia 1 litro de mezcal. Para ello, se entregan datos obtenidos mediante el instrumento de recolección y literatura, las cantidades estimadas se muestran en la **Tabla 7**.

Tabla 7. *Balance de materia y energía de la producción de mezcal*

Proceso	Consumo / Generación	Residuo / Emisiones
<i>Jima</i>	Entre 30 y 50 % del peso de las piñas.	Pencas de agave
<i>Cocción</i>	7 kg de leña	Emisiones de CO ₂ y CO
<i>Molienda</i>	-	Bagazo
<i>Fermentación</i>	Entre 7 -8 kg	Bagazo
<i>Destilación</i>	Entre 10 – 12 l, 7 kg de leña	Vinazas, emisiones (CO ₂ , CO)
<i>Reposado / Envasado</i>	N/A	-

El análisis del inventario de materiales y energía del proceso permite identificar con claridad los principales puntos de consumo de recursos naturales y la generación de residuos asociados a cada etapa productiva.

3.1.6 Conclusiones

La información obtenida a través del instrumento de recolección permite corroborar y sustentar los hallazgos reportados en la literatura científica y técnica previamente consultada. En este sentido, es posible identificar y plantear diversos cuestionamientos presentados como problemáticas ambientales inherentes al proceso artesanal de mezcal.

a) Pencas de agave

La etapa de jima constituye un proceso fundamental en la producción de mezcal, consiste en la remoción de las pencas para acceder a la parte con mayor concentración de azúcares (piña), determinante de la calidad del producto final. Las pencas eliminadas durante este proceso representan entre el 30 y 50 % del peso total de la planta. Pese a sus características y volumen, este residuo frecuentemente es dejado en el campo, donde se somete a un proceso de descomposición natural para su reintegración al suelo. No obstante, el bagazo muestra una considerable resistencia a la degradación natural, lo que puede resultar en su persistencia en el medio ambiente durante años sin reintegrarse al suelo, con posibles repercusiones [29], [73].

b) Agua (Contaminación y uso de grandes cantidades)

La producción artesanal de mezcal demanda volúmenes significativos de agua, generalmente extraída de pozos, arroyos y ríos cercanos a los sitios de producción. Algunos productores consideran que la devolución directa del agua residual a los cuerpos fluviales o su uso para riego constituyen una práctica ambientalmente responsable. Sin embargo, esta reutilización sin tratamiento adecuado resulta contraproducente, debido a que el proceso de producción altera el pH del agua, generando una afectación a los ecosistemas acuáticos y terrestres adyacentes [3].

c) Leña (Consumo y emisiones)

La cocción de las piñas de agave y el proceso de destilación requiere grandes cantidades de leña como fuente de combustible. Si bien algunos productores emplean leña seca, otros adquieren este recurso sin control sobre su origen, lo que puede fomentar la tala indiscriminada y la deforestación. La pérdida anual estimada de madera en la región alcanza los 2 mil m³, atribuida en gran parte a la tala ilegal. Además, con base en el informe proporcionado por el gobierno del estado de Oaxaca bajo el cumplimiento de la NOM-156_SEMARNAT-2012, reporta que la combustión de leña representa un margen significativo de producción de partículas contaminantes que contribuyendo al calentamiento global y a la degradación de la calidad del aire [74], [75], [76].

d) Bagazo (Gestión inadecuada)

El bagazo, residuo sólido derivado de las fibras de las piñas de agave, genera lixiviados con un pH aproximado de 4.6, lo que provoca alteraciones en la estructura y fertilidad del suelo, dificultando la fijación de nutrientes e influenciando la erosión. Aunque algunos productores reutilizan el bagazo para la elaboración de artesanías o como combustible, la quema de grandes volúmenes contribuyen a la emisión de dióxido de carbono, exacerbando la contaminación atmosférica y el cambio climático [9], [75].

e) Vinazas (Manejo inadecuado)

El vertido directo de vinazas, un subproducto ácido generado durante la destilación, en cuerpos de agua o suelos sin tratamiento adecuado, ocasiona impactos ambientales severos. Estas descargas afectan la fertilidad del suelo, contaminan mantos freáticos, ríos y arroyos, y provocan la mortalidad de fauna silvestre, déficit de oxígeno, eutrofización y fitotoxicidad en plantas y cultivos [3], [9], [30], [67].

Capítulo IV

Resultados de investigación

Posterior a la implementación de la metodología y el análisis de la información y conclusiones obtenidas mediante esta, a continuación, se presentan los resultados obtenidos, partiendo de la presentación de modelo conceptual, la identificación de las fuentes contaminantes del proceso, y las alternativas propuestas para reducir la contaminación generada por los desechos sólidos y contaminación del aire generados en la producción.

4. Resultados

A partir de la información obtenida mediante el instrumento de recolección de datos y la revisión de la literatura, permitió identificar los principales factores que generan contaminación durante el proceso. Adicionalmente se estableció la viabilidad de implementar indicadores de sostenibilidad, con el objetivo de proporcionar un panorama claro sobre el impacto ambiental generado y establecer una base sólida para la adopción de acciones correctivas o preventivas, que faciliten la toma de decisiones.

La **Figura 14**, presenta el modelo integral del proceso productivo. Este modelo se estructura en tres componentes principales: el flujo de producción, la identificación de contaminantes y la propuesta de indicadores para la medición de la sostenibilidad ambiental. Dicha estructura permite visualizar de manera clara y sistemática la relación entre las etapas del proceso, los residuos generados y las variables clave para el monitoreo ambiental.

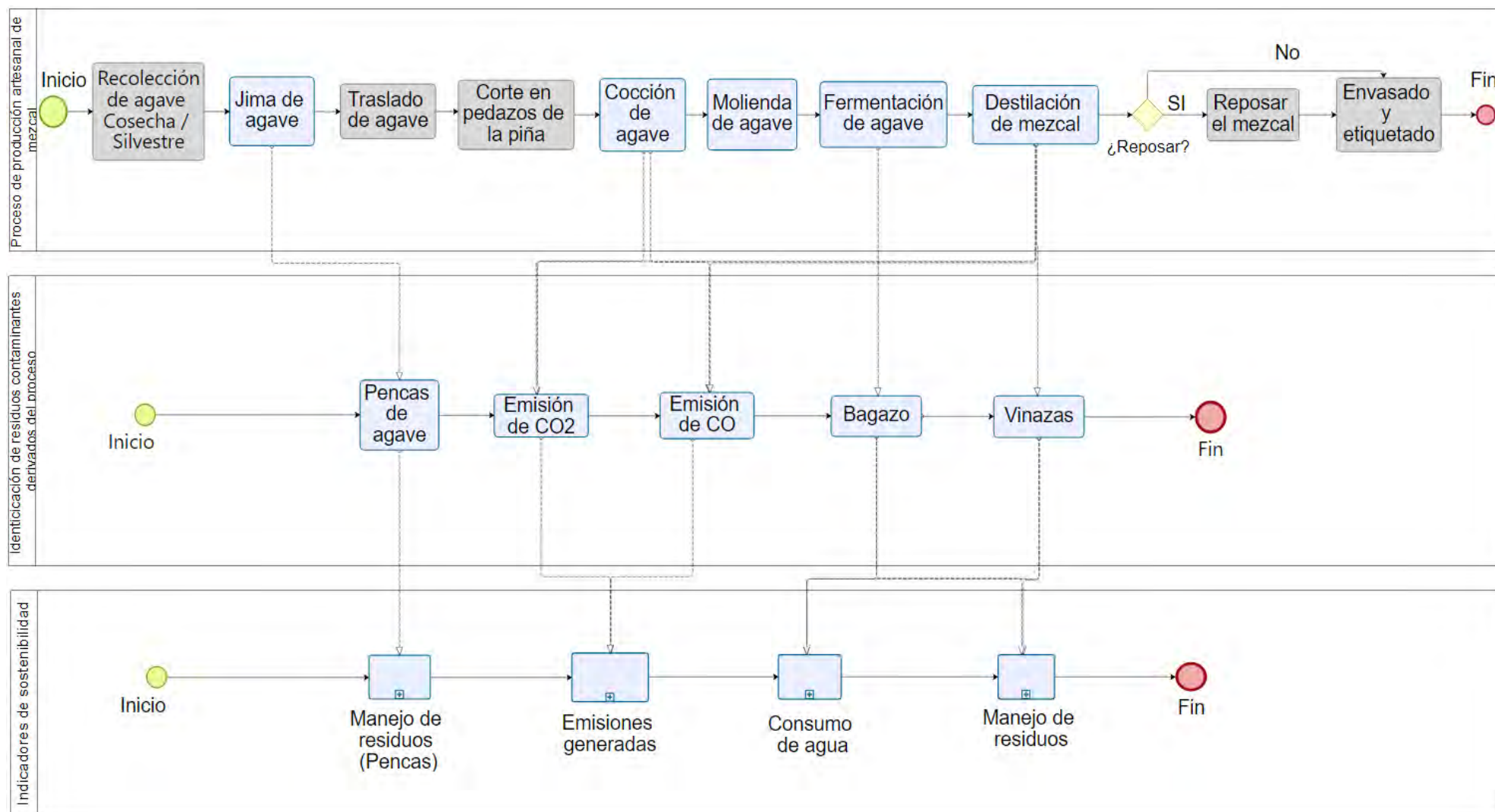


Figura 14. Modelado BPMN del proceso de producción artesanal de Mezcal

De acuerdo con lo presentado en la **Figura 14**, y en concordancia con los alcances definidos en la investigación, se identificaron cinco puntos clave de contaminación durante el proceso. Por cada punto se propusieron indicadores específicos que permitan monitorear y evaluar el impacto ambiental. La información presentada a continuación detalla cada uno de los cinco factores de contaminación identificados, así como los indicadores seleccionados para su seguimiento, fundamentados en la revisión de literatura y en el análisis de los datos recolectados.

4.1 Indicador de emisiones en la producción de mezcal

4.1.1 Contexto y justificación

El cambio climático se constituye en uno de los principales retos para la humanidad, dada las implicaciones que sus efectos generan sobre los diferentes sectores de la sociedad. La modificación del clima a escala global se atribuye principalmente al aumento de la concentración en la atmósfera de los denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI), originados por el uso intensivo de combustibles fósiles, la deforestación y otras actividades antrópicas, que están enmarcadas en patrones de consumo y producciones insostenibles [77]. El cálculo de las emisiones de GEI debe realizarse de acuerdo con la disponibilidad de datos. Lo óptimo para determinar las emisiones de procesos es utilizar mediciones directas de los gases de escape de los diferentes procesos. Sin embargo, como generalmente no se cuenta con estas mediciones, las emisiones deben estimarse multiplicando el consumo de combustible por factores de emisión específicos.

La información sobre las emisiones procedentes de un proceso de combustión de biomasa se encuentra en la literatura generalmente de dos maneras: relaciones de emisión o factores de emisión, según el tipo de referencia utilizado para su estimación. Estos parámetros correlacionan la emisión de una especie con respecto a otra especie de referencia como el CO₂ o el CO (relación de emisión, ER) o con respecto a la cantidad de biomasa quemada (factor de emisión, FE). En el caso de los gases, la relación de emisión se expresa en términos de relaciones molares, mientras que en el caso de las partículas particulares se expresa en masa de la partícula (gramo) por kilogramo de masa de carbono en forma de CO₂ u otro gas de referencia [78].

4.1.2 Metodología para la estimación de emisiones

Los factores de emisión son herramientas que permiten estimar la cantidad de emisiones de un determinado contaminante, generada por la fuente en estudio [77]. Para el caso específico de los gases emitidos por la combustión de leña, diversos estudios han establecido un factor de emisión 1.84 kgCO₂ por cada kg de leña quemada. Para evaluar las emisiones contaminantes, es fundamental conocer el poder calorífico de la leña, sin embargo, esta información no siempre está disponible, ya que depende del tipo de madera utilizada. No obstante, para estimar las emisiones, se pueden emplear datos empíricos. Como el factor de emisiones mencionado, la Tabla 4 muestra la estimación de producción de CO₂e.

Formulas empleadas:

- Emisiones de CO₂e (t/año) = [Producción anual de mezcal (L)] x [Consumo de leña (kg/L)] x [Factor de emisión (kgCO₂e/kg)] / 1,000
- Emisiones de CO (t/año) = [Producción anual de mezcal (L)] x [Consumo de leña (kg/L)] x [Factor de emisión (kgCO/kg)] / 1,000

4.1.3 Resultados: Emisiones por combustión de leña

Tabla 8. Emisiones de CO₂ y CO por combustión de leña

Fuente de emisión	Factor de emisión	Consumo específico (Por Litro de Mezcal)	Producción Anual de mezcal (L)	Emisión anual (t)
CO₂ (Leña)	1.84 kgCO ₂ e	7 kg	11,078,112	142,686.08
CO (Leña)	0.099 kgCO	7 kg	11,078,112	7,677.13

De acuerdo con la **Tabla 8**, la producción anual de mezcal en 2023 genero aproximadamente 142,686.08 toneladas de CO₂e y 7,677.13 toneladas de CO por el uso de leña como

combustible, cifras que superan los umbrales reglamentarios establecidos por la Ley General de Cambio Climático de México (LGCC).

En México, según la LGCC, que tiene por objetivo garantizar el derecho a un medio ambiente sano, todas aquellas instalaciones que iguales o superen las 25,000 toneladas de CO₂e anuales estarán obligadas a presentar el reporte de sus emisiones ante la SEMARNAT mediante el Registro Nacional De Emisiones (RENE), por otra parte, las regulaciones relacionadas a la misma cuestión sobre las emisiones de GEI buscan recopilar información sobre las emisiones generadas [79], [80]. En el Anexo A se muestra un formato para llevar a cabo el cálculo de emisiones de CO₂.

Por otra parte, la combustión de biomasa como la leña resulta en un proceso de combustión ineficiente del cual se generan subproductos de importancia ambiental, además de las emisiones de CO₂, se libera monóxido de carbono CO y otros contaminantes en menor proporción, cubriendo aproximadamente el 2% del total de gases emitidos lo que dificulta su medición. En condiciones desfavorables para una correcta combustión de biomasa, se liberan en gran parte emisiones de productos de combustión incompleta (PIC), como el monóxido de carbono CO es un gas liberado durante la combustión incompleta de materiales como la leña y el carbón. La inhalación de CO a altas concentraciones puede ser fatal, y a bajas concentraciones puede causar daño permanente del corazón y el cerebro [81], [82]. Por lo que utilizando el FE de Monóxido de carbono (CO) se obtiene la información de la **Tabla 8**.

4.1.3 Alternativa Sostenible: Briquetas de bagazo

A partir de la información obtenida y la consulta de diversos artículos, se identificó una oportunidad estratégica para implementar fuentes alternativas de energía para este proceso. Una alternativa de bajo costo y fácil acceso para los productores artesanales de mezcal radica en la elaboración de **Briquetas a base del desecho de la producción (bagazo)**, el proceso para la fabricación se muestra detalladamente en el apartado “Indicador de desechos de producción: Bagazo”. Las briquetas hechas a base de bagazo representan una alternativa para reducir y/o sustituir el consumo de leña, la combustión directa de estas biomásas (bagazo) no se recomienda debido al alto contenido de humedad y la baja densidad aparente, lo que da como resultado un bajo valor energético y emisiones de gases perjudiciales para el medio ambiente, por lo que, una opción correcta para la reutilización de bagazo en esta cuestión

(briquetas) lleva un proceso de seca donde al finalizar el bagazo queda apto para utilizar como combustible [83].

En [84] se llevó a cabo la valorización de las características relevantes para la implementación de briquetas elaboradas a partir de agave mezcalero. La producción de briquetas de bagazo de agave se fundamenta en un proceso que comprende el secado del bagazo, mezcla con aglutinantes, la compactación de la mezcla y un posterior secado de las briquetas, utilizando tecnología accesible para pequeños productores. Bajo estas condiciones se evaluó el uso de briquetas de dimensiones 12 x 26 x 6 cm y peso promedio de 373 g. Los resultados indicaron que la formula compuesta por 60% bagazo y 40% aglutinante constituyeron la alternativa optima, ya que presentan mayor tiempo de combustión. Es importante mencionar que el aglutinante también puede ser un recurso reutilizable (Papel o Cartón) si se tuviese la condición. Si bien el porcentaje de ceniza resulta 0.7% superior al de la leña, considerando que el bagazo es un residuo del proceso que no representa un costo extra para su obtención resulta viable. El proceso de fabricación de briquetas es cómodo de llevar a cabo para los productores, su elaboración sigue representando un mejor costo-beneficio en relación con el valor económico y sobre todo ambiental al disminuir este residuos.

1. Demanda térmica del proceso.

La síntesis de biocombustibles sólidos es una alternativa poco explorada para la revalorización de bagazo de agave derivado de la producción de Mezcal [85]. Este estudio cuantifica la cantidad de briquetas en kg, que se necesitan para satisfacer la demanda térmica de la cocción y el destilado de mezcal, tomando como base la elaboración promedio de 5,000 L de mezcal. Con base en diversos artículos, la **Tabla 9**, muestra teóricamente el flujo de calor necesario para la cocción de agave y destilación de agave que asciende a **10,777.76 MJ** [86].

Tabla 9. *Demanda energética de la producción.*

Demanda energética (MJ)	
Cocción	697.67
Destilación	10,080.00
Total	10,777.76

(Ecuación 1)

$$\text{Demanda energética por litro} = \frac{(697.67+10080)}{5000} = 2.1555 \text{ MJ/L}$$

2. Cálculo de masa de briquetas

Considerando un poder calorífico bruto aproximado de **18.3 MJ/kg** de las briquetas de bagazo y una eficiencia de combustión del 92 %, la masa necesaria por litro se calcula a continuación.

$$\text{Masa bruta} = \frac{2.1555 \text{ MJ/L}}{18.3 \text{ MJ/kg}} = 0.118 \text{ kg/L}$$

$$\text{Masa ajustada} = (0.118)(92\%) = 0.109 \text{ kg/L}$$

$$\text{Masa total} = (11,078,112 \text{ L}) \left(0.109 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \right) = 1,207,514 \text{ kg}$$

El total de briquetas necesaria para cubrir la demanda térmica por litro de mezcal producido, representa aproximadamente **3,237,304 unidades** de briquetas para cubrir la producción anual, teniendo en consideración la eficiencia de combustión de las briquetas del 92 % [87].

3. Emisiones

Una vez conocido el valor necesario de las briquetas, el Factor de emisión equivalente se presenta como **1.51 kgCO₂e/kg de briketa** aproximadamente, mientras que el Factor de emisión de leña es de **1.84 kgCO₂e/kg** [25], [84]. Llevando a cabo el cálculo, se obtuvo que las emisiones de CO₂ son inferiores que las emitidas por combustión de leña, de acuerdo con la **Tabla 10**.

Tabla 10. Cálculo de emisiones de CO₂

Fuentes de emisión	Factor de emisión (kgCO ₂ e/kg)	Combustible (KG/L)	Producción Anual (L)	Emisión anual (tCO ₂ e)
<i>Leña</i>	1.84	7	11,078,112	142,686.08
<i>Briquetas de bagazo</i>	1.51	0.109	11,078,112	1,823.35

Por lo tanto, las briquetas elaboradas a base de bagazo presentan un alto poder calorífico y una baja emisión de contaminantes, lo que las convierte en una opción para cubrir las necesidades energéticas de la destilación del mezcal, reduciendo aproximadamente hasta un 98 % las emisiones de CO₂ [84].

4.1.4 Análisis costo – efectividad

Se evaluó la viabilidad económico-ambiental de la alternativa de sustitución de leña tradicional por briquetas elaboradas con bagazo de agave del proceso artesanal de mezcal, mediante una análisis de costo-efectividad.

Producción anual supuesta de 10,000 litros.

1. Datos base.

Tabla 11. Datos base cuantitativos para la producción de mezcal.

Parámetros	Leña	Briquetas de bagazo
<i>Costo por Kg de combustible</i>	\$ 14.28 / kg	Bagazo: \$0.00 Aglutinante: \$1.20 / Briqueta
<i>Transporte</i>	\$ 60 / Carga (21kg)	N/A
<i>Consumo por litro</i>	7 kg / L	0.109 kg / L
<i>Energía útil (MJ/L)</i>	14.49 [88]	18.3
<i>Emisiones CO₂ anual</i>	142,686 t	1,823 t
<i>Inversión equipo</i>	N/A	\$ 5,000.00
<i>Sueldo anual operación</i>	N/A	\$ 80,294.4
<i>Producción anual</i>	10,000	10,000

2. Cálculo de costos de combustible

▪ Leña

Consumo total: $[7\text{kg/L}] \times [10,000\text{L}] = 70,000 \text{ kg/L}$

Costo de combustible: $[70,000 \text{ kg}] \times [14.28 \text{ \$/kg}] = 999,600 \text{ \$/kg}$

Cargas necesarias: $[70,000 \text{ kg}] / [21\text{kg/carga}] = 3,333.33 \text{ cargas}$

Costo de transporte: $[3,333.33 \text{ cargas}] \times [60 \text{ \$/carga}] = 199,999.8 = 200,000 \text{ \$}$

Costo total anual asociado a la leña: $[999,600] + [200,000] = 1,199,600 \text{ \$}$

▪ Briquetas

Consumo total: $[0.109\text{g/L}] \times [10,000\text{L}] = 1,090 \text{ kg/L}$

Briquetas: $[1,090 \text{ kg}] / [0.373 \text{ kg/Briqueta}] = 2,922 \text{ Briquetas}$

Costo de aglutinante por briqueta $[8 \text{ \$/1000g}] / [0.1492 \text{ kg}] = 1.19 \text{ \$/Briqueta}$

Costo total de aglutinante: $[2,922 \text{ Briquetas}] \times [1.19 \text{ \$/Briqueta}] = 3,478 \text{ \$}$

Costos asociados a operación: \$ 80,294.4

Costo de equipo (Briquetadora) = 5,000

Costo anual total asociado a las briquetas: $[3,478] + [80,294.4] + [5,000] = 88,772.00 \text{ \$}$

3. Análisis ambiental: Emisiones de CO₂**Tabla 12.** Cálculo de emisiones de CO₂

Parámetros	Leña	Briquetas
<i>Emisiones totales</i>	$(70,000 \times 1.84) / 1000 = 128.8$ tCO ₂ e	$(1,090 \times 1.51) / 1000 = 1.645$ tCO ₂ e
<i>Reducción relativa de CO₂</i>	Base	98.7 Reducción

4. Resumen comparativo

Tabla 13. Datos comparativos de la producción (Leña vs Briquetas)

Aspectos	Leña	Briquetas
<i>Costo total anual (\$)</i>	1,199,600.00	84,772.00
<i>Consumo de combustible (kg)</i>	70,000	1,090
<i>Emisiones anuales (tCO₂e)</i>	128.8	1.645
<i>Infraestructura (\$)</i>	N/A	5,000
<i>Impacto ambiental</i>	Alta deforestación y emisiones	Reducción significativa de emisiones y uso de residuos agrícolas
<i>Eficiencia térmica</i>	75 %	92 %

5. Conclusión

Desde una perspectiva económica, el uso de briquetas representa una reducción significativa en el costo total anual en comparación con el uso de leña (\$ 1,199,600 vs \$ 84,772.00). Estas diferencias se explican principalmente por el bajo costo de materia prima (Bagazo) y la eliminación de costes de transporte, a pesar de que la alternativa asume otros costos como operación o inversión inicial, sigue siendo económicamente viable. En términos de eficiencia energética, las briquetas presentan un rendimiento teórico superior, con una eficiencia térmica del 92 % frente al 75 % aproximado de la leña, lo que se traduce como menos consumo de combustible para alcanzar la misma producción. Desde el punto de vista ambiental, la sustitución de leña por briquetas conlleva una reducción

aproximada del 98 % de emisiones de CO₂, contribuyendo además a la mitigación de la deforestación y al aprovechamiento sostenible de residuos agrícolas.

Por lo tanto, se recomienda la adopción de briquetas de bagazo como alternativa costo – efectividad y ambientalmente sostenible para la producción de mezcal artesanal.

4.2 Indicador para el consumo y contaminación de agua

El desarrollo de un indicador que permite evaluar la afectación del recurso hídrico durante la producción artesanal de mezcal es esencial. Para ello, es necesario considerar aspectos relacionados con la calidad del agua y su impacto en el proceso productivo, con el objetivo de obtener una visión integral sobre la implementación del consumo de agua en la elaboración de mezcal. Este indicador servirá como base para establecer estrategias orientadas a la reducción del consumo hídrico, el cual se estima teóricamente en 20 litros por litro de mezcal producido.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el instrumento de recolección de información aplicado a sectores artesanales, se evidencia un nulo control sobre el uso de agua, por lo que, resulta importante documentar los puntos críticos del proceso productivo donde se emplea el agua (fermentación, destilación, enfriamiento, etc....), para posteriormente identificar las variables que influyen en la calidad del agua.

Para la implementación efectiva de un indicador del consumo de agua en la elaboración de mezcal, es indispensable mantener un registro aproximado del volumen de agua utilizada durante el proceso, así como, identificar el consumo específico de cada una de las etapas que lo requieren. Además, es fundamental conocer las fuentes de obtención del recurso hídrico para comprender su impacto ambiental. De acuerdo con diversos artículos es necesario responder los siguientes cuestionamientos relacionados con los factores y variables que inciden en la sostenibilidad del proceso:

1. ¿Cuál es la fuente de obtención del recurso hídrico (agua fluvial, pozo, captación de lluvia, etc....)?
2. ¿Cuál es el volumen de agua utilizada en cada etapa del proceso?
3. ¿Cuál es el rendimiento del proceso, es decir, la eficiencia en la producción de mezcal por kg de agave?

4. ¿A cuánto asciende el consumo total durante todo el proceso?
5. ¿Qué tipo de tratamiento recibe el recurso para su posterior reutilización?
6. ¿Se dispone de un sistema de enfriamiento para las etapas del proceso que lo requieran?
7. ¿Cuál es cantidad de agua residual al finalizar el proceso?

De igual manera las variables ambientales más influyen en la calidad del agua durante la producción de mezcal incluyen:

1. pH del agua: Las vinazas generadas durante la producción presentan un alto grado de acidez, lo que puede alterar negativamente el pH de los cuerpos de agua receptores, limitando la supervivencia de especies acuáticas y afectando el equilibrio ecológico [86].
2. Contaminantes químicos: La presencia de agroquímicos, como herbicidas y plaguicidas, utilizados en el cultivo de agave pueden contaminar el agua. Estos compuestos pueden ser tóxicos para la vida acuática y afectar la calidad del agua [89].
3. Sólidos suspendidos: la descarga de vinazas y otros residuos sólidos en cuerpos de agua puede aumentar la turbidez afectando la penetración de luz y por ende, la fotosíntesis en organismos acuáticos [89].
4. Temperatura del agua: Esta influye en la solubilidad del oxígeno y en las tasas metabólicas de los organismos acuáticos [90].
5. Materia orgánica: La concentración de materia orgánica presente en el agua puede influir en los niveles de oxígeno disuelto y en la actividad microbiana, afectando la salud de los ecosistemas acuáticos [6].

La combinación de estas variables determina significativamente la calidad del agua en las cuencas productoras de mezcal y el porcentaje de uso total del recurso hídrico, subrayando la necesidad de implementar prácticas sostenibles que minimicen su impacto ambiental.

4.2.1 Alternativa: Ósmosis inversa y/o Filtración Multimedia

Como alternativa para reducir el consumo de agua en el proceso, se propone la implementación de Ósmosis inversa, un proceso físico - químico que permite purificar el agua mediante la eliminación de partículas suspendidas. Este método cubre el primer paso

indispensable para adaptar el proceso: un análisis exhaustivo del agua para determinar su composición y los contaminantes que deben eliminarse.

La Ósmosis inversa se ha aplicado a otras industrias de producción de bebidas alcohólicas, como la producción de tequila, cuyo proceso resulta similar. Aunque el proceso del tequila no posee el carácter artesanal propio del mezcal, en la literatura, el tequila emplea aproximadamente 15 litros de agua para la elaboración de 1 litro de tequila, mientras que el mezcal utiliza 20 litros aproximadamente. En este contexto, la implementación de la ósmosis inversa permitiría teóricamente una reducción aproximada de 25 % en el uso de agua, es decir 5 litros menos por litro de Mezcal producido.

- Pretratamiento a la aplicación de ósmosis inversa.

Antes de implementar la osmosis inversa, es recomendable realizar un pretratamiento, para disminuir cantidad de materia orgánica y otros contaminantes, que pueden afectar la eficiencia y vida útil de las membranas. El pretratamiento puede incluir filtración multimedia, ablandamiento y decoloración.

1. Filtración Multimedia [91].

Objetivo:

Eliminar turbidez, sólidos en suspensión, metales pesados y sustancias orgánicas oxidadas.

Proceso:

- Se utilizan diferentes tipos de medios filtrantes (antracita o carbón mineral, arena, mineral natural) y grava de distintos tamaños en capas dentro de un tanque.
- El agua fluye a través de estas capas, donde cada medio retiene partículas de diferentes tamaños, removiendo sólidos suspendidos y la turbidez.
- Periódicamente, se realiza un retro lavado para limpiar los medios filtrantes y eliminar los sólidos acumulados.

Este proceso se presenta como una alternativa de bajo costo para la reutilización de agua para el uso de enfriamiento, limpieza de material y riego.

2. Ablandamiento [91]

Objetivo:

Eliminar la dureza del agua, es decir, reducir la concentración de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}).

Proceso:

- Se utiliza un intercambiador de iones que contiene una resina catiónica.
- La resina está cargada con iones de sodio (Na^+). Al pasar el agua a través de la resina, los iones de calcio y magnesio son intercambiados por iones de sodio.
- Cuando la resina se satura de calcio y magnesio, se regenera con una solución concentrada de cloruro de sodio (salmuera) para invertir el proceso y recargar la resina con iones de sodio.

3. Decloración [91].

Objetivo:

Eliminar el cloro libre del agua, ya que el cloro puede dañar las membranas de ósmosis inversa.

Procesos:

- Filtración con Carbón Activado: El agua pasa a través de un filtro de carbón activado, que absorbe el cloro y otros compuestos orgánicos, eliminándolos del agua.
- Dosificación de Bisulfito de Sodio: Se puede inyectar bisulfito de sodio (o metabisulfito de sodio) para reaccionar con el cloro y neutralizarlo. Es importante controlar la dosificación para evitar excesos de bisulfito.

Diversos estudios respaldan que el tratamiento de agua que incluye la osmosis inversa permite obtener un líquido purificado, apto para el lavado de instalaciones, maquinaria y torres de enfriamiento. Además, esta agua tratada podría utilizarse en la dilución de la bebida o fermentación, ya que no alteraría las características organolépticas propias del mezcal. Cabe destacar que la mayor parte del agua contaminada proviene de las vinazas. La propuesta de pretratamiento y osmosis inversa busca principalmente reducir el consumo total de agua.

4.2.2 Análisis costo efectividad

Para una producción anual de 10,000 L, se generan aproximadamente 150,000 L de vinazas, bajo el supuesto de que cada litro de mezcal genera 15 litros de vinaza. A continuación, se presenta un análisis costo efectividad comparativo entre la implementación de a osmosis inversa y la implementación de solo filtración multimedia. Bajo la consideración de la solvencia económica del pequeño o mediado productor.

1. Volumen

$[10,000 \text{ L mezcal}] \times [15 \text{ L Vinaza}] = 150,000 \text{ L de vinaza anual.}$

2. Costos de inversión y operación

Ósmosis inversa

- Costo de inversión: Entre \$ 50,000.00 y \$ 100,000.00 para sistema pequeño adaptado
- Capacidad de tratamiento entre 300 y 600 L/día.
- Eficiencia: Remoción > 90 % de materia orgánica, sales, fenoles y contaminantes disueltos.
- Mantenimiento anual: Reemplazo de membranas cada 2 o 3 años, consumo energético (0.1-0.3 kWh/m³). Entre \$5,000.00 y \$8,000.00

Filtración multimedia

- Filtros contruidos con materiales locales o bajo costo (Tanques metálicos o de concreto).
- Medios filtrantes: Grava, arena gruesa y fina y carbón activado en capas sucesivas.
- Operación manual o semiautomatizada, con retro lavado manual o por gravedad.
- Capacidad: Adaptable a volúmenes entre 400 – 500 L / día.
- Eficiencia: Remoción de sólidos y turbidez: 70 – 85 %. Reducción parcial de materia orgánica y color, pero limitada para compuestos disueltos y fenoles (remoción < 40 %).
- Costo de inversión: Entre \$30,000.00 y \$70,000.00 (Dependiente de materiales y mano de obra)

- Mantenimiento: Cambio o limpieza cada 2 – 5 años, retro lavados frecuentes manuales, por bomba o gravedad consumo bajo.

3. Análisis comparativo

Tabla 14. Datos comparativos para la producción (Ósmosis inversa vs Filtración multimedia)

Aspectos	Filtración Multimedia	Ósmosis inversa
<i>Capacidad de tratamiento</i>	400 – 500 L / día	300 – 600 L / día
<i>Inversión inicial</i>	\$30,000.00 - \$70,000.00	\$50,000.00 - \$100,000
<i>Costo operativos anuales</i>	\$1,000.00 - \$3,000.00	\$5,000.00 - \$8,000.00
<i>Consumo energético</i>	Muy bajo (Bomba o gravedad)	(0.1-0.3 kWh/m ³)
<i>Eficiencia de remoción</i>	70 – 85 % solidos suspendidas, <40 % materia orgánica y fenoles.	>90 % materia orgánica, sales fenoles y tóxicos.
<i>Impacto ambiental</i>	Reducción considerable de contaminantes.	Alta reducción de contaminantes
<i>Plazo de recuperación estimado</i>	Mayor recuperación, sin embargo, limitado por menor eficiencia.	3 – 5 años (Considerando reúso y beneficios ambientales)

4. Conclusiones

Ambas alternativas proponen soluciones, sin embargo, desde una perspectiva de mayor efectividad es recomendable la implementación de Ósmosis inversa (OI) y tomando en consideración los costes de inversión, y el panorama para el que se presenta la alternativa, la opción más económica es la filtración multimedia, que, aunque minimiza la problemática por sí sola no cumple completamente con el objetivo. Motivo por el cual, el escenario más idóneo que se propone es la combinación de filtración multimedia seguida de un sistema de osmosis inversa.

Como se muestra anteriormente la implementación de un pretratamiento de osmosis inversa, principalmente con una filtración multimedia, permite proteger las membranas de la (OI), reducir costos operativos y maximizar la eficiencia en la remoción de contaminantes.

4.3 Indicador de desechos de producción

El cumulo de gabazo y la aplicación de vinazas mediante el riego induce cambios físicos, químicos y bioquímicos en las propiedades del suelo. El primer efecto observable es la deposición de material orgánico en la capa superficial, provocando el endurecimiento del suelo. Diversos autores han reportado fenómenos como compactación y disminución de la permeabilidad, entre otros efectos que pueden ser tanto positivos como negativos.

La aplicación de residuos al suelo tiene diferentes efectos debido a factores como [92]:

- o La cantidad de residuos aplicada.
- o Tipo de suelo (arenoso, arcilloso o franco o sus combinaciones)
- o La composición química del suelo y la mineralogía predominante.
- o El tipo y la edad del cultivo en el momento del riego
- o La estación del año (temporada seca o lluviosa), etc....

Estos factores determinan la magnitud y naturaleza de las modificaciones en las propiedades del suelo, por lo que es fundamental considerarlos para evaluar el impacto ambiental y agronómico del uso de vinazas y bagazo en prácticas agrícolas.

4.3.1 Indicador de residuo: Vinazas

Las vinazas de mezcal presentan elevadas concentraciones de materia orgánica, con valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO5) entre 22,500 - 35,000 mg/L y Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre 35,000 - 122,000 mg/L, conductividad eléctrica (2.6-5.81 mS/cm), fenoles (58-542 mg/L), sólidos totales (45,000-96,000 mg/L), acidez (pH 3.5-3.94) y una temperatura de descarga elevada (70 a 90 °C) [67].

La disposición inadecuada de estos residuos puede presentar graves consecuencias ambientales en el suelo, tales como deterioro en su estructura, aumento de la fitotoxicidad, reducción de porosidad y obstaculizar la germinación de semillas.

Por otra parte, el vertido de vinaza en cuerpos de agua, por su alta carga de materia orgánica y nutrientes puede desencadenar el proceso de eutrofización del agua. Además, la temperatura elevada y la acidez de estos desechos también crean un entorno inhóspito para

la reproducción de diversas especies, afectando negativamente la biodiversidad acuática [67], [89].

4.3.2 Alternativa: Co - compostaje con Residuos Orgánicos

Las vinazas se pueden Co - compostar con residuos orgánicos sólidos, principalmente aquellos provenientes de las actividades agrícolas y agroindustriales. Este proceso no solo actúa como reparador del suelo, aportando propiedades fertilizantes para mejorar la calidad de este en zonas típicamente áridas, sino que también representa una tecnología de bajo costo. Por ello, resulta especialmente adecuada para regiones rurales, donde la adopción de tecnologías más sofisticadas es limitada debido a sus altos costos y la necesidad de personal especializado [89] [19].

Para el co - compostaje, se seleccionan residuos orgánicos como bagazo de agave o paja, que actuaran como soporte seco y fibroso. Las vinazas, en proporciones equilibradas, deben ser disueltas y mezcladas con los residuos sólidos. El proceso se lleva a cabo en pilas aireadas, asegurando una buena ventilación y humedad para optimizar la cantidad microbiana [32].

4.3.3 Análisis costo - efectividad

La aplicación en condiciones controladas de estos residuos como bio fertilizante favorece al rendimiento de cultivos aumentando la retención de agua y nutrientes del suelo [32].

1. Costos asociados.

Recolección y transporte:

La vinaza y el bagazo se generan en el mismo sitio de producción, lo que reduce costos logísticos. Sin embargo, el manejo de vinazas requiere contenedores o lagunas para almacenamiento temporal.

Estimación: \$5,000.00 - \$10,000.00 anuales.

Procesamiento (Compostaje):

Construcción de pilas o camas de compostaje, volteo manual o mecánico, riego.

Mano de obra para manejo y monitoreo (humedad y temperatura).

Tiempo de compostaje: Aproximadamente entre tres y cuatro meses.

Costos de estimados: \$15,000.00 - \$25,000.00 (insumo y mano de obra)

2. Efectividad del proceso y calidad del compost

Estudios muestran que el compost de bagazo co - compostado con vinaza producen un material estable, con buen contenido de nutrientes esenciales (N, P, K).

El proceso reduce carga orgánica y los compuestos tóxicos presentes en la vinaza, mejorando la estabilidad y valor químico.

Compost resultante es apto como mejorador de suelos, con potencial para recuperación de tierra improductiva y uso en agricultura orgánica.

Relación C: N (20:1 – 30:1) ideal para nutrir el suelo y promover la descomposición orgánica.

3. Impacto ambiental

Evita descargas de vinaza en suelos y cuerpos de agua.

Disminuye emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂ y metano) que ocurren en descomposición anaerobia de vinaza sin tratamiento.

Valorización de residuos sólidos y líquidos promoviendo economía circular.

4. Beneficios económicos potenciales

Compost puede venderse a agricultores locales o usarse para mejorar suelos propios, reduciendo costos de fertilizantes químicos.

Precio estimado de compost orgánico en mercados locales: Aproximadamente \$1,000.00 - \$2,500.00 por tonelada

Producción estimada: 1 tonelada de compost por cada 4 – 5 toneladas de mezcal.

5. Evaluación financiera

Tabla 15. Aspectos económicos considerados de la alternativa.

Aspecto	Rango estimado	Observaciones
<i>Inversión inicial</i>	\$20,000.00 – \$40,000.00	Infraestructura básica y acondicionamiento
<i>Costos operativos</i>	\$15,000.00 – \$25,000.00	Mano de obra e insumos
<i>Ingresos potenciales</i>	\$10,000.00 – \$20,000.00	Venta de compost y reducción en compra de fertilizantes químicos
<i>Plazo de recuperación</i>	3 – 5 años	Dependiendo del mercado local y la escala productiva

6. Conclusiones

El co - compostaje de vinaza con bagazo de agave es una alternativa costo - efectiva, ambientalmente sostenible y técnicamente viable para la valorización de residuos en la producción artesanal de mezcal. Ofrece beneficios claros en reducción de contaminantes, generación de compost de calidad y potencial económico mediante comercialización o uso agrícola [28].

4.4 Indicador de residuos: Bagazo

Por cada litro de mezcal producido, se generan alrededor de 15 kg de bagazo. Considerando que el peso promedio de una Briqueta es de 0.373 kg [84], en teoría, de esa cantidad de bagazo se podrían obtener alrededor de 40 briquetas. Sin embargo, al tomar en consideración el porcentaje de composición de briqueta óptimo de 60 % bagazo y 40 % aglutinante, la cantidad real es de $[.373] \times [60\%] = 0.2238$ kg de fibra residual. Por lo tanto, se producirían aproximadamente 67.02 piezas / 15 kg de bagazo.

Para el año 2023, la Producción Anual (PA) de mezcal fue de 11,078,112 litros, lo que genera un total estimado de 166,171,680 kg de fibra residual, con base en esta cifra se podrían fabricar 742,500.80 t de briquetas.

4.4.1 Alternativa: Briquetas de bagazo

La producción de briquetas a partir de bagazo de agave implica un proceso que incluye las etapas de secado, mezcla de aglutinante y compactación y secado de la briqueta, compactación de estos y secado de las briquetas. Este proceso utiliza tecnología accesible para pequeños productores, y presenta un producto con alto poder calorífico y baja emisión de contaminantes, lo que lo convierte en una opción viable para cubrir las necesidades energéticas de la destilación del mezcal.

Existen diversas propuestas de elaboración de briquetas para su uso como biocombustible a partir de residuos agroforestales, tales como fibras de racimos de frutos de palma o bagazo de caña de azúcar con almidón y melaza como aglutinante. Sin embargo, este estudio propone la integración de prácticas sostenibles en el ámbito de la producción de biocombustibles sólidos y la gestión de residuos sólidos de las fábricas de mezcal [84].

El equipo utilizado para la fabricación está elaborado en metal por un herrero, con dimensiones de 50 cm de alto, 30 cm de largo y 18.5 cm de ancho. El sistema de compresión es manual, por medio de una palanca de 50 cm de largo, que genera la presión necesaria para obtener briquetas de 14 cm de alto, 30 cm de largo y 16 cm de ancho [84]. El bagazo y el aglutinante son pesados para mantener el equilibrio 60-40 respectivamente. Para mantener la producción óptima de 60 % bagazo y 40 % aglutinante, ambos materiales se pesan cuidadosamente, se mezclan con agua y se dejan reposar en recipientes separados durante tres días antes del proceso de compactación.

4.4.2 Análisis costo - efectividad

En la **Tabla 13** se mostró un análisis comparativo de los costos asociados a la producción de briquetas a partir de residuos sólidos, frente al costo de utilizar leña convencional. Los resultados evidencian un margen significativo de ahorro económico, lo que resalta su viabilidad financiera.

1. Impacto en la reducción de residuos.

Disminución de residuos sólidos: La elaboración de briquetas permite valorizar la totalidad del bagazo generado, evitando su acumulación y disposición inadecuada o quema directa, que genera contaminación y malos olores.

Aprovechamiento energético: El bagazo, tradicionalmente considerado un residuo contaminante, se convierte en un biocombustible sólido útil para la propia destilación de mezcal.

Reducción de residuos a disposición final: La transformación de briquetas puede absorber prácticamente en su totalidad el bagazo generado, dependiendo de la capacidad instalada y la demanda energética, lo que contribuye a una gestión integral y sostenible del residuo.

2. Ventajas complementarias

Reducción de costos de disposición: Al valorizar el bagazo, se eliminan los costos asociados a su manejo y disposición.

Mejora ambiental: Se evita la contaminación del suelo y agua por los lixiviados, así como la proliferación de plagas asociadas a la acumulación de residuos orgánicos.

Sostenibilidad y economía circular: El proceso fomenta la economía circular al reincorporarse el residuo al ciclo productivo como insumo energético.

Esta alternativa contribuye positivamente al medio ambiente al promover el aprovechamiento eficiente de residuos sólidos y reducir la dependencia de recursos forestales naturales. Por lo tanto, la producción de briquetas constituye una estrategia sostenible con beneficios tanto económicos como ambientales.

4.5 Indicador de residuos: Pencas de agave

Durante el proceso de extracción de piñas de agave, conocida como jima, para la producción artesanal de mezcal, se eliminan las pencas del agave para obtener la parte de la planta con mayor concentración de azúcares, lo cual garantiza una mejor calidad del producto final. Estas pencas suelen representar entre el 30% y el 50% del peso total de la planta y, comúnmente, se descartan como residuos [36], [68]. Debido a su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, se clasifican como “residuos lignocelulósicos”, considerados fuentes valiosas para la producción de biocombustibles, celulosa y materiales nano celulósicos, con aplicaciones en diversas industrial [93]. Históricamente, las pencas fueron utilizadas por la cultura Azteca en diversas actividades socioculturales, representando la base para la

preparación de diferentes alimentos y bebidas (como el pulque o el mezcal), y en la elaboración de tejidos y textiles artesanales [25], [90].

La generación de residuos lignocelulósicos en la producción de mezcal es considerable, ya que para producir un litro de requieren entre 6 y 8 kg de piñas de agave, generando entre 7 y 15 kg de bagazo, que representa aproximadamente el 40 % del peso de la piña fresca [90], [93]. De manera similar, las pencas constituyen un volumen significativo de residuos, con potencial de valorización comparable al del bagazo [89].

4.5.1 Alternativa: Alimento para animales

Teniendo en consideración la adopción de alternativas viables para pequeños productores, resalta la reutilización de las pencas como alimento para animales, una estrategia sostenible que puede reducir significativamente el impacto ambiental de la producción de mezcal. Esta práctica no solo disminuye la cantidad de residuo generado, si no también representa un ingreso adicional para el productor y/o reducción de costos para quienes crían ganado [93].

La preparación del alimento para animales (forraje) a partir de pencas implica varios pasos para hacerla digerible y nutritiva para el ganado, primero se cortan o trituran las pencas en trozos pequeños, se someten a fermentación durante 30 días en contenedores cerrados, conocido como ensilaje. Este proceso reduce el pH y mejora la palatabilidad del forraje y digestibilidad, asegurando la conservación de la mayoría de los nutrientes esenciales para el ganado [25], [94].

El porcentaje de reducción de contaminantes ambientales estaría en dependencia directa del porcentaje de aprovechamiento y transformación de las pencas de agave en este subproducto, contribuyendo a mitigar la acumulación de residuos en el entorno rural y a fomentar una economía circular dentro de la industria mezcalera [34], [66]

4.5.2 Análisis de Costo – Efectividad.

Las pencas de agave son comúnmente descartadas o dejadas en el suelo para completar un ciclo natural de descomposición, aunque es un proceso lento y poco efectivo, generando impactos ambientales negativos como emisiones de gases de efecto invernadero y deterioro del suelo [93]. Sin embargo, estas pencas son ricas en celulosa, fibra cruda y azúcares, lo que

las convierte en un recurso valioso para la alimentación de rumiantes, especialmente en zonas con escasez de forraje durante la estación seca [95].

1. Costos asociados

Inversión inicial: \$ 18,788.00 a \$ 35,788.00

Cortadora / picadora: \$ 15,000.00 a \$ 30,000.00

Contenedor y bolsa para ensilaje: \$ 1,000.00 a \$ 3,000.00

Mano de obra (10 días): \$ 2,788.00

Beneficios

Pencas disponibles supuesta: 30,000 kg/año

Ahorro en compra de forraje (\$ 7.50 / kg): \$ 225,000.00 anual

Tiempo de recuperación aproximado: 1 mes considerando el ahorro.

2. Conclusión

La implementación del uso de pencas de agave como alimento para animales es una alternativa accesible para pequeños productores en regiones mezcaleras. Permite transformar un residuo abundante en un recurso nutritivo, reduciendo costos de alimentación y mitigando impactos ambientales negativos asociados a la quema y acumulación de residuos. Se recomienda fomentar programas de capacitación y acceso a tecnologías de procesamiento para maximizar los beneficios de esta práctica.

Capítulo V

Conclusiones

Este capítulo contiene las conclusiones generales de la investigación, enfatizando en la sostenibilidad ambiental necesaria en el proceso, la adopción de prácticas más sostenibles enfoque y sobre todo, reconociendo que existen alternativas que pueden hacer la diferencia para una producción ambientalmente amigable.

5.1 Conclusiones

El estudio integral de la producción artesanal de mezcal en Oaxaca revela que, si bien esta actividad representa un pilar cultural y económico de gran relevancia para la región y el país, enfrenta retos sustanciales en materia de sostenibilidad ambiental. El crecimiento acelerado de la demanda y la consecuente intensificación de la producción han incrementado la presión sobre los recursos naturales fundamentales como el agave, la leña y el agua, cuya explotación, en ausencia de una gestión eficiente y responsable, puede comprometer la viabilidad a largo plazo del sector. La investigación refleja que la falta de registros precisos sobre el consumo de insumos y la generación de residuos limita la capacidad de los productores para identificar áreas de mejora y adoptar prácticas sostenibles.

Entre los aportes de este estudio se destaca la sistematización de procesos ambientales clave mediante el uso de la notación BPMN. Esta herramienta permite mapear de manera sistemática las etapas críticas del proceso productivo, facilitando la visualización y comprensión de puntos estratégicos, componentes ambientales significativos y formular recomendaciones orientadas a la reducción del impacto ambiental. El modelo desarrollado, aunque conceptual en esta fase inicial, ofrece una plataforma metodológica innovadora para formular recomendaciones dirigidas a reducir el impacto ambiental e impulsar la transición hacia modelos productivos responsables.

La originalidad del proyecto radica justamente en la aplicación de la metodología BPMN, comúnmente empleada en la automatización de procesos empresariales al contexto particular de la producción artesanal de mezcal. Este enfoque permitió tener una visión estructurada

pero flexible, adaptable a las condiciones y requerimientos específicos de las comunidades productoras. La principal ventaja de utilizar BPMN recae en su capacidad para identificar en fases próximas cuellos de botella, visualizar flujos de insumos y residuos, y proponer acciones concretas de mejora ambiental, todo a través de un lenguaje grafico fácilmente interpretable.

Sin embargo, el estudio presenta algunas limitantes. Primero, la conceptualización del modelo BPMN se mantuvo en una etapa teórica, por lo que no fue posible validar empíricamente su desempeño a escala piloto o industrial. Además, la disponibilidad y precisión de datos sobre el consumo real de recursos y la generación de residuos sigue siendo limitada, en gran parte por la ausencia de registros sistemáticos entre los productores. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer la recopilación y digitalización de la información ambiental.

Entre hallazgos más relevantes destaca la necesidad de implementar indicadores específicos de sostenibilidad, que permitan cuantificar tanto el consumo de recursos como la generación y manejo de residuos, la capacitación de los productores en gestión ambiental y la promoción de buenas prácticas, tales como la valorización de subproductos y la optimización del uso de insumos, resultan fundamentales para avanzar hacia una producción eficiente y responsable. Asimismo, se subraya la importancia de fortalecer las políticas y los incentivos institucionales que favorezcan la conservación de diversidad biológica y cultural del mezcal, además de encaminar la producción bajo la guía de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Pese a estas restricciones, las perspectivas de aplicación futura son alentadoras. La adopción de modelos digitales y herramientas de automatización o simulación derivadas del BPMN abriría la posibilidad de monitorear en tiempo real el desempeño ambiental, optimizar recursos y reducir la huella ecológica del sector mezcalero.

Finalmente, la investigación enfatiza que la sostenibilidad ambiental no debe considerarse un obstáculo, si no una oportunidad estratégica para diferenciar y fortalecer la industria mezcalera en mercados nacionales e internacionales, además en el Anexo 1 y 2 se presenta información resumida de la investigación para poder hacer de conocimiento las cuestiones ambientales involucradas. La adopción de modelos de producción más sostenible contribuirá no solo a la preservación de los recursos y ecosistemas locales, sino también a la

consolidación de la identidad y competitividad de mezcal artesanal, asegurando su permanencia y relevancia para las generaciones futuras.

5.2 Trabajos futuros

Se recomienda que el trabajo futuro aborde de manera integral la sistematización y digitalización del modelo BPMN propuesto para la gestión ambiental en la producción artesanal de mezcal. La implementación de plataformas digitales que permitan la captura y actualización en tiempo real de datos sobre consumo de recursos y generación de residuos facilitara la identificación de áreas críticas y la optimización de prácticas sostenibles. Paralelamente, es fundamental evaluar la viabilidad económica y social de la adopción de estas tecnologías, considerando los costos, beneficios y barreras de implementación, así como su impacto ambiental de la expansión mezcalera sobre la biodiversidad local y los servicios ecosistémico, con el fin de diseñar estrategias de conservación y manejo sustentable que asegure la preservación de los recursos naturales y la diversidad genética de las especies de agave. Esta aproximación multidimensional permitirá fortalecer la sostenibilidad del sector mezcalero, integrando innovación tecnológica, bienestar social y conservación ambiental.

Bibliografía

- [1] Secretaría de Economía, “Denominación de origen del mezcal”, Secretaría de relaciones exteriores. [En línea]. Disponible en: <https://consulmex.sre.gob.mx/mcallen/images/stories/PDF/2016/spmezcal.pdf>
- [2] M. G. Liria, I. J. Davidson-Hunt, y J. P. Robson, “Artisanal Products and Land-Use Land-Cover Change in Indigenous Communities: The Case of Mezcal Production in Oaxaca, Mexico”, *Land*, vol. 11, núm. 3, p. 387, mar. 2022, doi: 10.3390/land11030387.
- [3] V. R. González, H. M. P. Varaldo, J. G. Mayer, y N. R. Ordaz, “Combined 201 Mezcal Vinasses by Ozonation and Activated Sludge”, *Water Environ. Res.*, vol. 90, núm. 11, pp. 1985–1996, nov. 2018, doi: 10.2175/106143017X15054988926433.
- [4] Gobierno del Estado de Morelos, Morelos. *Anuncio de la denominación de origen del Mezcal*, (junio de 2025). [Transmisión]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Uu7KbGgmnRI>
- [5] D.G. Adjunta de planeación. & E.A & D.E. de A.S., “Monografía del Mezcal”. Financiera rural., marzo de 2011. [En línea]. Disponible en: <https://embamex.sre.gob.mx/belice/images/stories/docs/mezcal.pdf>
- [6] J. A. Bautista, “Sustentabilidad y agricultura en la ‘región del mezcal’ de Oaxaca* Sustainability and agriculture in the ‘mezcal region’ of Oaxaca”, vol. 3, núm. 1, pp. 5–20, feb. 2012.
- [7] COMERCAM, “Informe Estadístico 2024”, COMERCAM, Oaxaca, Estadístico 13, 2024.
- [8] F. Palma, P. Pérez, y V. Meza, “Diagnóstico de la Cadena de Valor Mezcal en las Regiones de Oaxaca”. 2016. Consultado: el 20 de septiembre de 2024.
- [9] P. S. Mateo, R. M. V. Sánchez, J. G. Velázquez, y A. R. Flores, “Adobes sustentables a partir de los desechos de la producción de mezcal”, *Rev. Glob. Negocios*, vol. 9, núm. 1, pp. 45–59, 2021.
- [10] A. J. G. Mendoza, “Los agaves de México”, *Ciencias*, núm. 87, pp. 14–23, 2007.
- [11] Grupo de Estudio Ambientales, “Informe de Mercadeo Maguey / Mezcal”, UNEP, WCMC, Guerrero, México, Económico-Mercadeo, 2002.
- [12] M. H. Cruz, “Innovación En El Modelo De Negocios De Empresas Familiares Productoras De Mezcal Artesanal”, Tesis, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, EDO. MEX., 2017. [
- [13] P. Pérez-Akaki, N. V. Vega-Vera, Y. P. Enríquez-Caballero, y M. Velázquez-Salazar, “Designation of Origin Distillates in Mexico: Value Chains and Territorial Development”, *Sustainability*, vol. 13, núm. 10, p. 5496, may 2021, doi: 10.3390/su13105496.
- [14] N. V. V. Vera y P. P. Akaki, “Oaxaca y sus regiones productoras de mezcal: Un análisis desde cadenas globales de valor”, núm. 29, pp. 103–132, jun. 2017.
- [15] S. Hernández, A. Gnolonfin, M. Bialostosky, y G. G. Contreras, “Economics of Land Degradation Initiative: La Economía de la Producción de Mezcal en Oaxaca, México.”, *El camino hacia la producción sostenible de agave. GLZ: Bonn, Alemania*, p. 75, 2022.
- [16] D. I. C. Medina, S. E. M. Cuéllar, J. S. Gómez, y C. M. R. Peralta, “Innovation of Women Farmers: A Technological Proposal for Mezcalilleras’ Sustainability in Mexico, Based on Knowledge Management”, *Sustainability*, vol. 13, núm. 21, p. 11706, oct. adobes, doi: 10.3390/su132111706.
- [17] K. M. Y. Bazán, “Estudios Preliminares Para El Establecimiento De Un Signo Distintivo De Protección Para Los Mezcales Proveniente De Agaves Silvestre De La Mixteca Alta De Oaxaca, México.”, Tesis, IPN, Xoxocotlán, Oaxaca, México, 2024.

- [18] J. M. Martínez, E. Baltierra Trejo, P. Taboada González, Q. Aguilar Virgen, y L. Marquez Benavides, “Life Cycle Environmental Impacts and Energy Demand of Craft Mezcal in Mexico”, *Sustainability*, vol. 12, núm. 19, p. 8242, oct. 2020, doi: 10.3390/su12198242.
- [19] Ricardo Casas-Cázares*, Félix V. González-Cossío, Tomas Martínez-Saldaña, Edmundo García-Moya, Benjamín V. Peña-Olvera, “Sostenibilidad y Estrategias En Agroecosistemas Campesinos De Los Valles Centrales De Oaxaca”, vol. 43, núm. 3, p. 13, may 2009.
- [20] P. D. Férman y G. G. D. Férman, “Empresas rurales sustentables en la Sierra Sur del estado de Oaxaca. Un estudio de caso”, vol. 1, p. 6, feb. 2015.
- [21] M. I. F. Salazar, “La inocuidad y denominación de origen del mezcal mexicano en su proceso de internacionalización en el marco de sustentabilidad”, vol. 2, núm. 10, p. 16, 2022.
- [22] Catarina Illsley Granich y Grupo de Estudios Ambientales AC, “Las leyes que regulan el aprovechamiento del maguey y del mezcal”. octubre de 2004. [En línea]. Disponible en: http://mezcalestradicionales.mx/mezcales_herencia_cultural_y_bio/Ponencias%20PDF/26%20G%20Leyes%20Maguey%20Mezcal.pdf
- [23] J. F. O. Ruiz, “Ley Para El Manejo Sustentable Del Maguey Del Estado De Hidalgo”, *Inst. Estud. Legis.*, vol. II, p. 29, 2016.
- [24] Unidos por el mezcal y Sector Maguey Mezcal, “Proyecto De Ley De Desarrollo Sustentable Del Maguey Mezcal”. 2019.
- [25] A. Estrada Maya y B. Weber, “Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática”, *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 23, núm. 2, pp. 1–10, abr. 2022, doi: 10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.009.
- [26] M. Hidalgo-Reyes, M. Caballero-Caballero, L. H. Hernández-Gómez, y G. Urriolagoitia-Calderón, “Chemical and morphological characterization of Agave angustifolia bagasse fibers”, *Bot. Sci.*, vol. 93, núm. 4, pp. 807–817, dic. 2015, doi: 10.17129/botsci.250.
- [27] L. Chávez-Guerrero y M. Hinojosa, “Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands”, *Fuel*, vol. 89, núm. 12, pp. 4049–4052, dic. 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.07.026.
- [28] G. A. M. Gutiérrez, G. Í. Covarrubias, Y. D. Ortiz-Hernández, J. Y. López-Cruz, y M. A. B. Cruz, “Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate”, *Rev Int Contam Ambie*, vol. 29, núm. 3, pp. 209–216, 2013.
- [29] J. Álvarez-Chávez, A. Castrejon, M. Gaytán-Martínez, y A. K. Ramírez-Jiménez, “Effect of Ohmic heating, ultrasound and extrusion on the bioactive composition and nutritional value of Agave bagasse from Mezcal production”, *Elsevier*, vol. 100, mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103897>.
- [30] V. R. González, J. G. Mayer, N. R. Seijas, y H. M. P. Valardo, 2002010, *J. Biotechnol.*, vol. 157, núm. 4, pp. 524–546, feb. 2012, doi: 10.1016/j.jbiotec.2011.09.006.
- [31] S. A. Díaz-Barajas, I. Moreno-Andrade, E. B. Estrada-Arriaga, L. García-Sánchez, y M. A. Garzón-Zúñiga, “Biohydrogen, Volatile Fatty Acids, and Biomethane from Mezcal Vinasses—A Dark Fermentation Process Evaluation”, *Fermentation*, vol. 10, núm. 4, p. 217, abr. 2024, doi: 10.3390/fermentation10040217.
- [32] E. A. Zelaya-Benavidez, G. A. Martínez-Gutiérrez, C. Escamirosa-Tinoco, y I. Morales, “Vinazas de mezcal y su efecto biofertilizante en el rendimiento de hortalizas”, *Ecosistemas Recur. Agropecu.*, vol. 8, núm. 3, p. 12, 2021, doi: <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.3159>.
- [33] K. A. Lemus-Sagrero, Chávez-Parga, D.C., y Cortés, J.A., “Improvement in Methane Concentration in the Biogas Produced through the Co-digestion of Food Waste and

- Mezcal Vinasses.”, *BioEnergy Res.*, vol. 17, p. 14.2-1412, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10717-0>.
- [34] Red Temática Mexicana Aprovechamiento Integral Sustentable y Biotecnología de los Agaves, “Panorama del aprovechamiento de los agaves en México”, 1ra ed., Guagalajara, Jalisco, México, 2017, p. 302.
- [35] J. L. Jaramillo-Villanueva y E. García-Benítez, “Assessing sustainability in Puebla’s artisanal mezcal production: Insights from a composite indicator approach”, *Agro Product.*, vol. 12, núm. 17, pp. 25–32, dic. 2024, doi: 10.32854/agrop.v17i12.3176.
- [36] M. D. L. Pérez-Zavala, J. C. Hernández-Arzaba, D. K. Bideshi, y J. E. Barboza-Corona, “Agave: a natural renewable resource with multiple applications”, *J. Sci. Food Agric.*, vol. 100, núm. 15, pp. 5324–5333, dic. 2020, doi: 10.1002/jsfa.10586.
- [37] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, “Guía Técnica para la descripción varietal”. 2014. [
- [38] García Mendoza, A.J y Franco Martínez I.S., “Actualización de la información de las especies y subespecies de magueyes de Oaxaca, con énfasis en las especies mezcaleras”, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología, Coyoacan, Ciudad de México., Informe final SNIB_CONABIO NE012, jul. 2018.
- [39] D. Pal, D. Kesh, y D. Mukherjee, “Study of a Diffusive Intraguild Predation Model”, *Acad. Environ. Sci. Sustain.*, vol. 2, núm. 1, 2025, doi: 10.20935/AcadEnvSci7508.
- [40] International Labour Office, y P. Poschen, “Social Criteria And Indicators For Sustainable Forest Management”. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)GmbH, julio de 2000.
- [41] M. Kandziora, M. Felix, B. Burkhard, C. Schimming, y W. Windhorst, “Ecological Indicators: Ecosystem Health”, en *Managing Biological and Ecological Systems*, 2a ed., B. D. Fath, S. E. Jørgensen, y M. Cole, Eds., CRC Press, 2020, pp. 207–227. doi: 10.1201/9780429346170-23.
- [42] J. H. Camacho-Vera, J. M. Vargas-Canales, y P. Durán-Ferman, “Avatares de la producción de Mezcal en la región Miahuateca de la Sierra Sur de Oaxaca.”, *Limiar REstudios Soc. Humanist.*, vol. XIX, núm. 1, pp. 183–194, jun. 2021, doi: 10.29043/liminar.v19i1.794.
- [43] Diario Oficial de la Federación, “Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-1994, Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones.”, SEGOB. Consultado: el 11 de noviembre de 2024.
- [44] Diario Oficial de la Federación, “Nom-007-SEMARNAT-1997”. 1997.
- [45] Martínez Castillo Róger., “Sistemas de producción agrícola sostenible”, *Tecnol. En Marcha*, vol. 22, núm. 2, pp. 23–39, 2009,
- [46] J. Sachs, *La era del desarrollo sostenible: Nuestro futuro está en juego. Incorporaremos el desarrollo sostenible a la agenda política mundial*, Deusto., vol. 1. Barcelona: Centro Libros PAPF, S. L. U., 2015. Consultado: el 14 de marzo de 2024.
- [47] Naciones Unidas, “Objetivos de desarrollo sostenible”, Naciones Unidas. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es>
- [48] Z. Y. G. Carvajal y H. Espinosa-Andrews, “La Producción de Mezcal en el Estado de Michoacán”, *Mundo Nano Rev. Interdiscip. En Nanociencia Nanotecnología Cent. Investig. Asist. En Tecnol. Diseño Estado Jalisco AC*, vol. 9, núm. 17, p. 117, ene. 2017, doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2016.17.58159.
- [49] E. P. Hernández, Ma. del C. C. Parga, y J. C. G. Hernández, “Revisión del agave y el mezcal”, *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. XVIII, núm. 1, pp. 148–164, 2016, doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552.
- [50] J. P. Lara-Ávila y Á. G. Alpuche-Solís, “Análisis de la diversidad genética de agaves mezcaleros del centro de México”, *Rev Fitotec Mex*, vol. 39, núm. 3, pp. 323–330, 2016.

- [51] I. Torres-García, “Estado de conservación de los agaves mezcaleros de origen silvestre”, *La Jornada del campo*, el 17 de diciembre de 2022. Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/2022/12/17/delcampo/articulos/conservacion-agave-silvestre.html>
- [52] K. Y. R. Mondragón, “Genómica Evolutiva y de la Conservación en Especies de Agave Mezcalero”, Doctorado en Ciencias Biomédicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México, CDMX, 2024.
- [53] ONU, “Report of the World Commission on Environment and Development”. General Assembly, 1987. [En línea]. Disponible en: <https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf>
- [54] G. Velázquez, “Economía Circular y Gestión Sostenible: Un Enfoque Teórico para Abordar los Problemas Ambientales”, *Rev. Veritas Difus. Científica*, vol. 6, núm. 1, pp. 478–496, ene. 2025, doi: 10.61616/rvdc.v6i1.417.
- [55] Segarra-Jiménez Estefanía, “Importancia de la sostenibilidad ambiental y sus pilares en el siglo XXI desde un enfoque ecológico”, *Green World J.*, vol. 5, núm. 2, pp. 1–9, ago. 2022, doi: <https://doi.org/10.53313/gwj52025>.
- [56] M. V. P. Botero y I. C. E. Álvarez, “La sostenibilidad ambiental regional. Una propuesta metodológica para su estudio más allá de la ecología urbana”, *Rev. Luna Azul*, núm. 34, pp. 131–147, mar. 2012, doi: 10.17151/luaz.2012.34.9.
- [57] M. C. Larrouyet, “Desarrollo sustentable: origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta”, Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Argentina, 2015.
- [58] Dr. Z. Li, Dr. Q. Zhu, y Dr. C. Gold, *Digital terrain modeling: principles and methodology*. New York: CRC Press, 2005.
- [59] Álvaro Carvajal Villaplana, “Teorías y modelos: formas de representación de la realidad”, vol. 12, núm. 001, p. 15, 2002.
- [60] Angel M. Felicísimo, *Modelos Digitales del Terreno*, 1a ed. Asturias: PENTALFA, 1994. [En línea]. Disponible en: <https://www6.uniovi.es/usr/feli/pdf/libromdt.pdf>
- [61] Mónica de Torres Curth, *Los Reyes De La Pasarela: Modelos Matemáticos En Las Ciencias*, Primera edición. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación de Historia Natural Félix de Azara, 2015.
- [62] J. A. Plasencia Soler, F. Marrero Delgado, A. M. Bajo Sanjuán, y M. Nicado García, “Modelos para evaluar la sostenibilidad de las organizaciones”, *Estud. Gerenciales*, pp. 63–73, mar. 2018, doi: 10.18046/j.estger.2018.146.2662.
- [63] Universidad de los Andes, “Modelamiento de Procesos con BPMN”. enero de 2016.
- [64] Analítica, “Manual de Diagramación de Procesos Bajo Estandar BPMN”.
- [65] E. Reina-Guaña, “Modelo de un Plan Estratégico Green IT y BPM para minimizar el impacto ambiental en la educación superior”, *Novasinería Rev. Digit. Cienc. Ing. Tecnol.*, vol. 4, núm. 1, pp. 136–150, jun. 2021, doi: 10.37135/ns.01.07.08.
- [66] M. Z. H. San Juan, “Caracterización del proceso de producción de mezcal artesanal en San Baltazar Chichicapám, Ocotlán Oaxaca”, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Ex Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, 2024.
- [67] Sergio Alberto Díaz Barajas, Marco Antonio Garzón Zúñiga, y Iván Moreno Andrade, “Tratamiento de vinazas de mezcal: revisión de procesos y propuesta de tren de tratamiento”, *Rev. Latinoam. El Ambiente Las Cienc.*, vol. 11, núm. 28, pp. 216–220, 2020.
- [68] M. G. Contreras-Hernández *et al.*, “Effect of ultrasound pre-treatment on the physicochemical composition of Agave durangensis leaves and potential enzyme

- production”, *Bioresour. Technol.*, vol. 249, pp. 439–446, feb. 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.10.009.
- [69] L. Fischer y B. Silver, Eds., *BPMN 2.0 handbook: methods, concepts, case studies and standards in business process management notation*. Lighthouse Point, Fla: Future Strategies Inc, 2011.
- [70] Dr. C. A. Z. Zaror, “Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos”, Concepción Chile, 2020.
- [71] Sistema de información geográfica del estado de Oaxaca, “Síntesis de Información geográfica del estado de Oaxaca”, INEGI, Oaxaca, Geográfico, 2004.
- [72] P. S. Vásquez-Rasgado y G. Rodríguez-Ortiz, “Los suelos de los valles centrales de Oaxaca”, *Rev. Mex. Agroecosistemas*, vol. 5, núm. 2, pp. 156–167, 2018.
- [73] J. Montañez-Soto, J. Venegas-González, M. Vivar-Vera, y E. Ramos-Ramírez, “Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del Agave tequilana Weber Azul”, vol. 23, núm. 3, 2011.
- [74] M. Sánchez, “Ecuador: Revisión a las principales características del recurso forestal y de la deforestación”, *Rev. Científica Tecnológica UPSE*, vol. 3, núm. 1, pp. 41–54, dic. 2015, doi: 10.26423/rctu.v3i1.70.
- [75] A. C. Angón y S. S. Jerónimo, “Estrategia para la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad del estado de Oaxaca”, *CONABIO*, vol. 1, pp. 23–77, 2018.
- [76] Tejeda Le Blanc & Cía., S.C., “Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) de la Zona Metropolitana de Oaxaca.”, Instituto Estatal de Ecología y Desarrollo Sustentable, Zona Metropolitana de Oaxaca, Programa Final, may 2014.
- [77] Corporación ambiental empresarial (CAEM), “Guía Metodológica Para El Cálculo De La Huella De Carbono Corporativa A Nivel Sectorial”, p. 42, jun. 2013.
- [78] Z. Padilla-Barrera *et al.*, “Determination of emission factors for climate forcers and air pollutants from improved wood-burning cookstoves in Mexico”, *Energy Sustain. Dev.*, vol. 50, pp. 61–68, 2019, doi: 10.1016/j.esd.2019.02.004.
- [79] SGI, A. de J. R. Bautista, M. A. M. Martínez, y G. M. Paredes, “Guía de Usuario Registro Nacional de Emisiones (RENE)”. Ricardo Castillo Martínez, 2008.
- [80] Diario Oficial de la Federación, “Ley General de Cambio Climático”. junio de 2012.
- [81] V. Pinzon, “Medición de la exposición a material particulado, monóxido de carbono y black carbon por combustión doméstica de leña en la vereda Los Soches, Usme.”, *Univ. Los Andes*.
- [82] K. R. Smith, “Health, energy, and greenhouse-gas impacts of biomass combustion in household stoves”, *Energy Sustain. Dev.*, vol. 1, núm. 4, pp. 23–29, nov. 1994, doi: 10.1016/S0973-0826(08)60067-8.
- [83] E. Afra, A. Abyaz, y A. Saraeyan, “The production of bagasse biofuel briquettes and the evaluation of natural binders (LNFC, NFC, and lignin) effects on their technical parameters”, *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 123543, ene. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123543.
- [84] E. H. Contreras, J. Cruz, y L. M. Benavides, “Valorización energética de briquetas de agave mezcalero”, *CIIDIR, Unidad Oaxaca*, vol. 7, núm. Especial, pp. 07–16, septiembre de 2023.
- [85] E. E. Enríquez, S. I. M. Guido, O. D. L. Montañón, y C. G. Antonio, “Elaboración De Pellets Combustibles A Partir De Bagazo De Agave”, *Perspect. Cienc. Tecnol.*, vol. Especial, pp. 243–256, may 2023.
- [86] D. Melchor Quintas, I. Carvajal-Mariscal, y P. Quinto Díez, “Metodología de cálculo y modelado de las necesidades térmicas en el proceso de producción de una destiladora

- de mezcal tradicional”, *Acta Univ.*, vol. 34, pp. 1–18, ene. 2024, doi: 10.15174/au.2024.3880.
- [87] J. D. López Rivera, C. E. Cajina Valdivia, J. U. Ramírez Camas, E. A. Reyes Aguilera, N. R. Olivas Reyes, y L. D. L. Á. Molina Cruz, “Evaluación de los parámetros físicos y químicos de las briquetas obtenidas con la maquina briquetadora construida en FAREMEstelí”, *Rev. Científica FAREM-Estelí*, núm. 16, pp. 3–14, may 2016, doi: 10.5377/farem.v0i16.2600.
- [88] Secretaría de Energía (SENER), “Balance Nacional de Energía 2019”, Dirección General de Planeación e Información Energética, DGPIE.210.013.2021, feb. 2021.
- [89] A. R. Cortés y C. de la C. Hernández, “El mezcal, su producción y tratamiento de residuos”, *Alianza y Tendencias*, vol. 2, núm. 8, pp. 10–14, diciembre de 2017.
- [90] Consejo Regulador del Tequila, “Manual Del Técnico Tequilero”, *Gadalajara, Jalisco, México*, núm. Primera edición, pp. 5–311, enero de 2019.
- [91] Empresa Pure Aqua, Inc., “Pretratamiento de Ósmosis Inversa”, Pure Aqua Inc. Consultado: el 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.pureaqua.com/blog/pretratamiento-de-osmosis-inversa/>
- [92] R. G. Moran-Salazar *et al.*, “Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives”, *SpringerPlus*, vol. 5, núm. 1, p. 1007, dic. 2016, doi: 10.1186/s40064-016-2410-3.
- [93] Ana M. Avila-Galván *et al.*, “La Segunda Vida Del Agave: Nuevas Aplicaciones Para Residuos Agroindustriales De Las Industrias Del Tequila Y Mezcal”, *Front. Biotecnológica*, núm. 29, pp. 34–43, dic. 2024.
- [94] A. A. de la Torre, I. de J. R. García, J. R. O. Hernández, y V. F. Hernández, “1a Jornada de Investigacion Universitaria”, *Cent. Univ. Los Altos*, núm. Primera edición, 2011.
- [95] J. Martinez-Gomez, R. A. Vargas-Méndez, y G. L. Osorio-Gordillo, “Main Wastes from Artisanal Mezcal Production and Their Environmental Impact”, *Tecnol. Cienc. Apl.*, vol. 7, núm. 2, pp. 139–142, dic. 2024.

Anexo 1

El mezcal es una bebida alcohólica obtenida del destilado del jugo fermentado de las piñas de agave cocidas. Su producción se remonta a tiempos prehispánicos, adoptada como símbolo de identidad y orgullo para México.

Si bien las producciones artesanales podrían relacionarse adecuadamente con el medio ambiente, lo cierto es que, en el caso de la producción de mezcal, la implementación de los recursos naturales en gran escala y la generación de diversos subproductos contaminantes resultan en un tema de relevancia.



La aplicación de las alternativas propuestas, buscan reducir significativamente de los contaminantes provenientes de la producción artesanal de mezcal, además, de ser alternativas de bajo costo y facilidad de implementación. Encaminado a una producción más sostenible.



Sostenibilidad

y

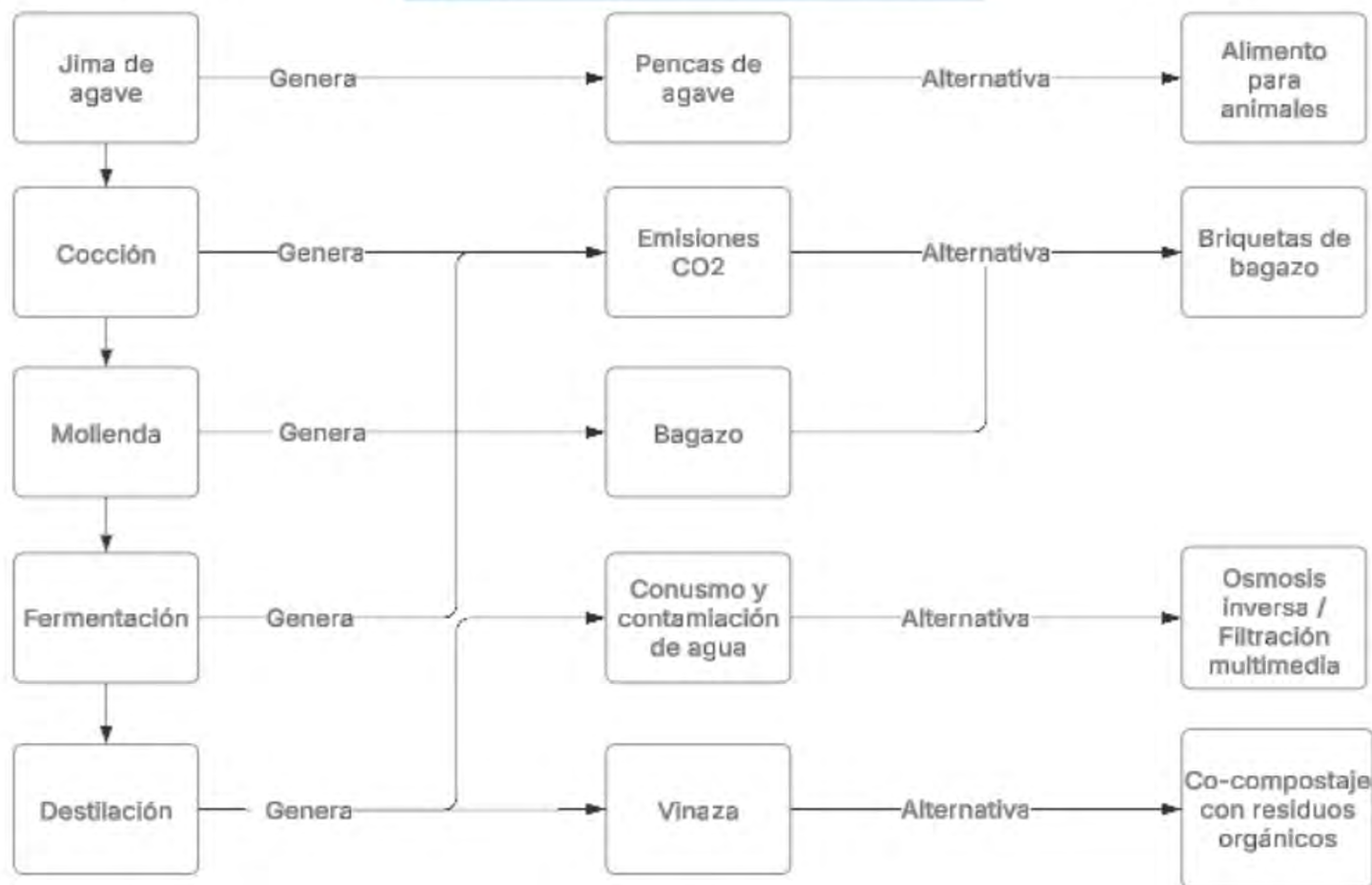
MEZCAL ARTESANAL

Cultura en cada copa,
futura sostenibilidad
en cada paso.

Proceso de producción artesanal de mezcal

Problemática ambiental en el proceso de producción de mezcal

Propuesta para aprovechamiento de subproductos



La producción artesanal de mezcal, ha presentado un incremento considerable en su consumo y producción.

Impactando en el uso de recursos naturales y en el incremento de los desechos provenientes de la misma.

Por lo que, resulta importante evaluar y mitigar el impacto ambiental asociado a los métodos tradicionales de elaboración.

Mezcal Artesanal



El mezcal es una bebida alcohólica obtenida del destilado del jugo fermentado de las piñas de agave cocidas. Su producción se remonta a tiempos prehispánicos, adoptada como símbolo de identidad y orgullo para México.

En los últimos años, se ha impulsado un notable incremento en su producción a nivel nacional, evidenciando la creciente demanda en el mercado.

La producción artesanal de mezcal, ha presentado un incremento considerable en su consumo y producción, lo que impacta en el uso de recursos naturales e incrementa los desechos provenientes de la misma, por lo que, resulta importante evaluar y mitigar el impacto ambiental asociado a los métodos tradicionales de elaboración.



Sostenibilidad y

MEZCAL ARTESANAL

Cultura en cada copa,
futura sostenibilidad
en cada paso.

Proceso de producción artesanal de mezcal

Jima de agave



Es el corte de todas las pencas del agave para obtener el corazón o piña, dejando como **residuo** las **pencas** del mismo.

Cocción



Las piñas de agave son cortadas en pedazos mas pequeños y se llevan a cocción en hornos.

Molienda



Los trazos de piña cocida, son molidas con una piedra chilena jalada por un animal, para obtener el apelmazado de agave.

Fermentación



Esto juega un papel importante en la elaboración de bebidas alcohólicas como el mezcal. Los mostos resultante son los que pasan a la siguiente etapa.

Destilación



Los mostos obtenidos de la fermentación pasan a este punto para convertirse en mezcal.

Problemática ambiental en el proceso de producción de mezcal

PENCAS DE AGAVE

Estas pencas suelen representar entre el 30% y el 50% del peso total de la planta y, comúnmente, se descartan como residuos.

EMISIONES DE CO₂

La disposición inadecuada de estos residuos puede tener graves consecuencias ambientales en el suelo, puede deteriorar su estructura, aumentar la fitotoxicidad, reducir la porosidad y obstaculizar la germinación de semillas.

BAGAZO

El bagazo, esta compuesto por las fibras restantes de las piñas de agave, se generan entre 8 y 15 kg de bagazo por cada litro de mezcal producido. Estos provocan trastornos en los suelos, impidiendo que los nutrientes se fijen en este y ocasionen erosión.

VINAZA

Las vinazas de mezcal presentan elevadas concentraciones de materia orgánica, conductividad eléctrica, fenoles, sólidos totales, acidez (pH 3.5-3.94) y una temperatura de descarga elevada. La disposición inadecuada de estos residuos pueden aumentar la fitotoxicidad, reducir la porosidad y obstaculizar la germinación de semillas.

CONSUMO DE AGUA

Para la elaboración de 1 litro de mezcal se necesitan aproximadamente 20 litros de agua, el lugar donde se toma este recurso y la disposición de esta al finalizar el proceso, son cuestiones importante para el ambiente.

Propuesta para aprovechamiento de subproductos



Forraje para animales



La preparación del alimento para animales (Forraje). El porcentaje de reducción de contaminantes estaría en dependencia con el porcentaje de aprovechamiento y transformación de las pencas de agave en este subproducto.



Briquetas de bagazo



La combustión de biomasa tradicional (como leña) resulta ineficiente energéticamente, además de generar subproductos ambientales relevantes, incluyendo emisiones de CO₂, CO y otros contaminantes. Las briquetas de bagazo ofrecen una alternativa para reducir o sustituir el uso de leña en procesos productivos.



Co-compostaje con residuos orgánicos



Las vinazas se pueden Co - compostar con residuos orgánicos sólidos. reparadores para el suelo con propiedades fertilizantes para mejorar la calidad de este en áreas típicamente áridas.



Ósmosis inversa y/o Filtración Multimedia



Como alternativa para reducir el consumo de agua usada en el proceso se propone la implementación de Ósmosis inversa, que es un proceso físico - químico mediante el cual es posible purificar el agua eliminando partículas suspendidas.