



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

**ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO ARTESANAL DE
PRODUCCIÓN DE MEZCAL**



TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

APROBADA



Presenta:

ING. YESENIA MANILLA TELLEZ

Bajo la supervisión de: DR. ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ



Chapingo, Texcoco, Estado de México; octubre de 2023

**ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO ARTESANAL DE
PRODUCCIÓN DE MEZCAL**

Tesis realizada por **Yesenia Manilla Tellez** bajo la supervisión del Comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
AGROALIMENTARIA**

DIRECTOR



DR. ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ

ASESOR



DR. LUIS CARLOS MIRANDA TRUJILLO

ASESOR



DR. TEODORO ESPINOSA SOLARES

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
Lista de apéndices	viii
ABREVIATURAS	ix
DEDICATORIA	xi
AGRADECIMIENTOS.....	xii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xiii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
2 REVISIÓN DE LITERATURA	16
2.1 Importancia económica de la producción y comercialización del mezcal 16	
2.2 Producción por categoría.....	16
2.3 Envasado para mercado de exportación	17
2.4 Especies de maguey empleados para elaboración de mezcal	18
2.5 Proceso artesanal de producción de mezcal	19
2.6 Diagrama de flujo de proceso	20
2.7 Fundamento de los balances de materia.....	21
2.8 Fundamento de los balances de energía.....	21
2.9 Análisis del ciclo de vida: Un enfoque para evaluar la sostenibilidad de productos y procesos	22
3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN ARTESANAL DE MEZCAL	24

3.1	Introducción	26
3.2	Materiales y métodos.....	28
3.2.1	Definición del objetivo y alcance	28
3.2.1.1	Descripción del proceso artesanal de mezcal.....	30
3.2.1.2	Escenarios.....	32
3.2.2	Fuente de datos	34
3.2.3	Análisis de inventario	34
3.2.4	Evaluación de impacto	34
3.3	Resultados y discusión	35
3.3.1	Impacto ambiental generado por el proceso de producción artesanal de mezcal ensamble y mezcal tepeztate	35
3.3.1.1	Etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble que contribuyen al impacto ambiental.....	36
3.3.1.2	Etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble que contribuyen al impacto ambiental.....	37
3.3.2	Contribución de los escenarios al Impacto ambiental	38
3.3.2.1	Potencial de agotamiento abiótico	39
3.3.2.2	Potencial de calentamiento global	39
3.3.2.3	Potencial de ecotoxicidad acuática marina.....	40
3.3.3	Comparación del análisis del ciclo de vida en los cuatro escenarios	40
3.3.3.1	Escenario base	41
3.3.3.2	Escenario 1.....	41

3.3.3.3	Escenario 2.....	42
3.3.3.4	Escenario 3.....	43
3.3.4	Principales categorías impactadas por los cuatro escenarios.....	44
3.3.5	Comparación con literatura	45
3.4	Conclusiones	46
3.5	Agradecimientos	47
3.6	Apéndices	48
3.7	Literatura citada	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos recopilados en campo para el inventario del ciclo de vida de los cuatro escenarios.....	34
Tabla 2. Resultados el análisis del ciclo de vida en los cuatro escenarios.....	39
Tabla 3. Emisiones de CO ₂ reportadas en bebidas destiladas.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción de mezcal en sus tres categorías a nivel nacional correspondiente al 2022.	17
Figura 2. Crecimiento de envasado de exportación de 2012 hasta 2022.	18
Figura 3. Especies de maguey más representativas en la producción nacional de mezcal 2022.....	19
Figura 4. Fábrica de producción artesanal de mezcal perteneciente a “Tres magueyes”, San Luis Amatlán, Miahuatlán, Oaxaca.	29
Figura 5. Límite del sistema de producción artesanal de mezcal. Los cuadros en color gris no se adhieren al enfoque “de la cuna a la puerta”.	30
Figura 6. Escenarios del proceso de fabricación de mezcal artesanal.....	33
Figura 7. Porcentaje de contribución de la producción artesanal de mezcal ensamble y mezcal tepeztate evaluado en las diferentes categorías de impacto.	36
Figura 8. Impacto de las etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble en las diferentes categorías.....	37
Figura 9. Impacto de las etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble en las diferentes categorías.....	38
Figura 10. Escenario base.	41
Figura 11. Escenario 1.....	42
Figura 12. Escenario 2.....	43
Figura 13. Escenario 3.....	44
Figura 14. Contribución de los diferentes escenarios en tres categorías de impacto más relevantes para el estudio.....	45

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Diagrama de bloques.....	48
Apéndice 2. Diagrama de flujo.....	49

ABREVIATURAS

ACV: Análisis del Ciclo de Vida

ICV: Inventario del Ciclo de Vida

PET: Tereftalato de polietileno

NOM: Norma Oficial Mexicana

Alc. Vol.: Volumen de Alcohol

ISO: Organización Internacional de Normalización

E = Energía

m = Masa

c = Velocidad de la luz

CML: Instituto de Ciencias Medioambientales

PAA: Potencial de agotamiento abiótico

PA: Potencial de acidificación

PE: Potencial de eutrofización

PEAAD: Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce

PCG: Potencial de calentamiento global

PTH: Potencial de toxicidad humana

PEAM: Potencial de ecotoxicidad acuática marina

PACO: Potencial de agotamiento de la capa de ozono

PCOF: Potencial de creación de ozono fotoquímico

ET: Ecotoxicidad terrestre

DEDICATORIA

Dedico este logro a mis queridos padres, Yolanda Tellez García y Marcial Manilla Gayosso, por su persistente apoyo y amor incondicional que me han guiado hasta este momento. A mis hermanos, por estar siempre a mi lado, impulsándome a dar lo mejor de mí.

A ti, mi novio William Guzman Zaragoza, por ser mi soporte y motivación constante, por creer en mí incluso cuando parecía que me iba a rendir dudé. Eres mi inspiración y mi resguardo en cada paso que he dado.

Esta tesis es un testimonio de esfuerzo y dedicación, dedico sus frutos a todos ustedes, sabiendo que su apoyo perdurará en cada logro futuro.

¡Gracias por todo!

AGRADECIMIENTOS

En el camino de esta investigación, deseo expresar mi profunda gratitud al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por su valioso apoyo financiero, que hizo posible la realización de este proyecto y contribuyó significativamente al avance del conocimiento en esta área.

Quiero reconocer y agradecer a la Dirección General de Investigación y Posgrado por su constante respaldo y fomento al desarrollo académico, brindando las herramientas necesarias para alcanzar mis metas.

Mi sincero agradecimiento al Dr. Artemio Pérez López por su guía experta, sus perspicaces sugerencias y su apoyo inquebrantable durante todo el proceso de investigación. Sus conocimientos y dirección fueron fundamentales para dar forma y profundidad a este trabajo.

Al Dr. Luis Carlos Miranda Trujillo, le agradezco por su valiosa contribución y sus comentarios constructivos que enriquecieron este proyecto, aportando nuevas perspectivas y dimensiones.

Al Dr. Teodoro Espinosa Solares, extiendo mi agradecimiento por su orientación experta y su dedicación, que me inspiraron a superar desafíos y a crecer como investigador.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Yesenia Manilla Tellez

Fecha de nacimiento: 19 de abril de 1998

Lugar de nacimiento: Tulancingo, Hidalgo

CURP: MATY980419MHGNLS07

Profesión: Ingeniero Agroindustrial

Cédula profesional: 12658346

Desarrollo académico

Preparatoria: Centro de Estudios de Bachillerato CEB 6/7 Gabino Barreda.

Licenciatura: Universidad Autónoma Chapingo.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El mezcal, una bebida ancestral con profundas raíces culturales, se ha convertido en un emblema de la tradición y el patrimonio mexicano. El proceso artesanal de producción de mezcal ha perdurado a lo largo de los siglos, manteniendo técnicas que preservan el conocimiento ancestral. Sin embargo, en el contexto actual de preocupación por la sostenibilidad y el impacto ambiental de las actividades humanas, es fundamental evaluar la producción de mezcal desde una perspectiva más holística.

Al comienzo de la implementación de la Norma Oficial Mexicana (NOM), solo cuatro estados tuvieron el permiso para producir Mezcal: Oaxaca, Guerrero, Durango y San Luis Potosí. Sin embargo, en el año 2001 se incorporó Guanajuato, en 2003 Tamaulipas, en 2012 Michoacán, y finalmente, en 2015 Puebla. Con los estados añadidos, la capacidad de producir esta bebida ascendió, abarcando un área de 500 mil kilómetros cuadrados casi un 25 % del territorio nacional. En el caso específico del estado de Oaxaca la producción de mezcal aumentó y se ubicó el estado productor más importante, con el 91.31 % de la producción nacional de mezcal referido a 45 % Alc. Vol. (COMERCAM, 2023). Esta bebida alcohólica destilada es clasificada en tres categorías por su proceso de elaboración: ancestral, artesanal e industrial, de la cual la categoría artesanal es de los mezcales principalmente producidos en Oaxaca. Además, el clima de las zonas productoras de mezcal es cálido subhúmedo, propicio para el cultivo del maguey utilizado en la elaboración de esta bebida tradicional.

Debido a la importancia de esta bebida se destacan diversas investigaciones enfocadas a sus compuestos volátiles; estrategias de mercadotecnia y comercialización del producto. En la actualidad existe poca información con respecto a los impactos ambientales que pueda generar la producción artesanal de mezcal con respecto a otras bebidas destiladas como ginebra, coñac, vodka

y whisky, en donde se ha calculado la huella de carbono tanto de la producción de la bebida como del embotellado con la herramienta ACV basada en la normatividad internacional (ISO, 2006) que evalúa el impacto ambiental del procesamiento de productos y servicios.

Por lo tanto, es importante destacar que el impacto ambiental de las bebidas destiladas puede variar significativamente dependiendo del tipo de bebida, el proceso de producción y las prácticas de sostenibilidad implementadas por los productores.

Algunos de los principales aspectos ambientales que pueden verse afectados son: uso de recursos naturales necesarios para la producción de materia prima empleada para las bebidas destiladas, como granos, frutas, maguey, etc. pueden demandar grandes cantidades de agua y suelo. Además, la energía utilizada para destilar y procesar las bebidas también genera un impacto significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), lo que contribuye al cambio climático. Así mismo, se generan residuos orgánicos, como vinazas o bagazo, que requieren un tratamiento para evitar impactos negativos en el medio ambiente. Finalmente el material de los envases utilizados para comercializar las bebidas destiladas, generan un impacto ambiental significativo, especialmente si no se reciclan adecuadamente (De Feo et al., 2022).

México exhibe una amplia producción artesanal de mezcal, por esta razón, es necesario analizar el impacto que genera esta bebida, dado que al ser un proceso artesanal no se encuentra estandarizada su producción. En este sentido, se planteó como objetivo analizar el impacto ambiental que genera la producción artesanal de mezcal en cuatro distintos escenarios, mediante herramientas de diagnóstico ingenieril y ACV.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia económica de la producción y comercialización del mezcal

El mezcal, una emblemática bebida alcohólica originaria de México, ha experimentado un significativo auge en su producción y comercialización en las últimas décadas, lo que ha llevado a convertirse en un componente crucial de la economía mexicana. La creciente popularidad del mezcal tanto a nivel nacional como internacional ha generado un impacto económico positivo en varias dimensiones (Arellano Plaza et al., 2022).

2.2 Producción por categoría

De acuerdo con COMERCAM (2023), la producción nacional de mezcal 2022 equivalente a 45% Alc. Vol., fue de 14,165,505 litros, representando la categoría de mezcal artesanal una producción del 95.35% de la producción total (**Figura 1**).

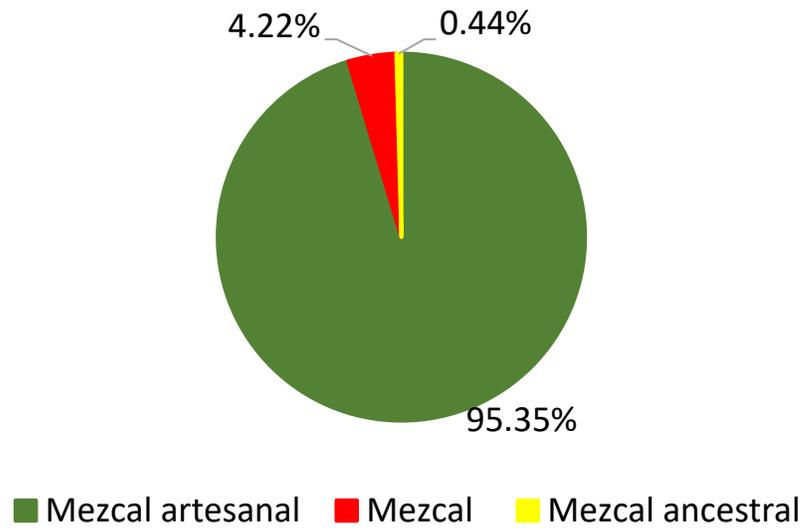


Figura 1. Producción de mezcal en sus tres categorías a nivel nacional correspondiente al 2022.

2.3 Envasado para mercado de exportación

La exportación de mezcal ha sido un motor clave para el aumento de las divisas en la economía mexicana. El incremento de la demanda internacional de mezcal, especialmente en mercados como Estados Unidos, Canadá, Europa y Asia, ha impulsado las exportaciones de esta bebida. En consecuencia, se han generado mayores ingresos para el país, contribuyendo a equilibrar la balanza comercial y fortaleciendo la economía nacional. Es por lo que en la **Figura 2** se puede observar una tasa de crecimiento en el envasado 2022 del 67.43% respecto al 2021 (COMERCAM, 2023).

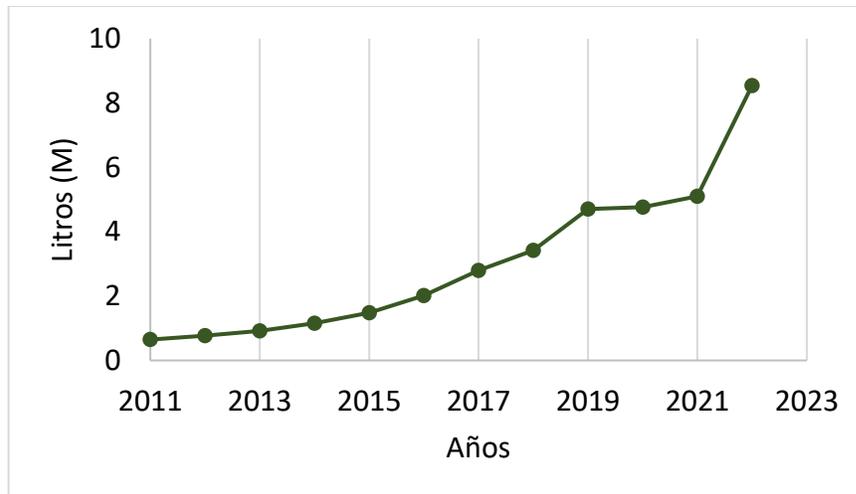


Figura 2. Crecimiento de envasado de exportación de 2012 hasta 2022.

Además de los aspectos antes mencionados, la producción y comercialización del mezcal también ha tenido un impacto social y cultural significativo en las comunidades productoras. El fortalecimiento y promoción de esta tradición ancestral ha permitido preservar el conocimiento y las técnicas de producción transmitidas de generación en generación, promoviendo un sentido de identidad y orgullo cultural entre los habitantes de estas regiones.

2.4 Especies de maguey empleados para elaboración de mezcal

En Mesoamérica el maguey fue de las primeras plantas en ser aprovechadas. México se distinguió por ser el centro de domesticación y diversificación de estas plantas mediante la selección de los pobladores, quienes las diferenciaban por las cantidades de azúcares y fibras; tal es el caso de los tallos de los magueyes que se sometían a cocimiento (Pérez Hernández et al., 2016).

Oficialmente el mezcal es una bebida alcohólica destilada obtenida por fermentación y posterior destilación del guarape y bagazo obtenido a partir del maguey cocido. Según Arellano (2022) esta bebida cuenta con una producción regulada por la NOM-070-SCFI-1994, inclusive tiene Denominación de Origen en donde Oaxaca destaca por el número de especies de maguey empleadas, altos volúmenes de producción y sus procesos artesanales de producción de mezcal.

COMERCAM (2023), reporta que la mayor producción de mezcal se proviene principalmente del maguey espadín (*Agave angustifolia*) representando el 81.08 % de la producción a nivel nacional (**Figura 3**). Las especies de maguey mayormente empleados en la fabricación del mezcal se clasifican en cultivados y silvestres (Blumenthal et al., 2021).

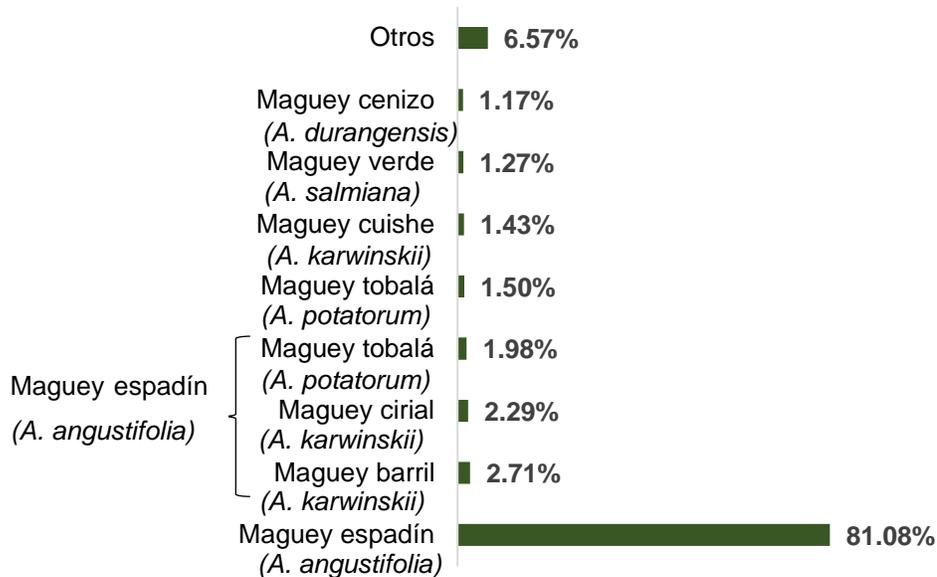


Figura 3. Especies de maguey más representativas en la producción nacional de mezcal 2022.

La fabricación de mezcal con especies nativas de agave ha incorporado elementos de identidad cultural y revalorización de la diversidad biológica; además, se ha desarrollado una cultura de los mezcales, con una producción diferenciada y única realizada en pequeña escala.

2.5 Proceso artesanal de producción de mezcal

La elaboración de mezcal comprende cuatro etapas básicas en su proceso de elaboración: cocción, molienda, fermentación y destilación (González Seguí et al., 2020).

Para el caso de elaboración de Mezcal Artesanal, la etapa de cocimiento consiste en someter las cabezas de agave a una exposición lenta de calor dentro de

hornos de pozo o elevados de mampostería, para su ablandamiento, provocando la hidrólisis de los fructanos de maguey convirtiéndolos en azúcares simples.

Una vez que las cabezas están cocidas se muelen con mazo, tahona, molino chileno, trapiche o desgarradora para extraer el jugo o simplemente obtener el bagazo (pulpa y fibra) de maguey, de esta manera acelerar la conversión de los azúcares en alcohol, generándose compuestos volátiles agradables durante la fermentación natural, que puede llevarse a cabo en oquedades en piedra, suelo, piletas de mampostería, recipientes de madera, barro o pieles de animal.

La fermentación depende mucho de los microorganismos presentes en el entorno de producción, conformada mayoritariamente por levaduras que, durante los primeros días, se reducen drásticamente debido a la intolerancia al etanol, dando lugar al crecimiento y proliferación de otras especies como las *Saccharomyces* que presentan tolerancia (Torres-Velázquez et al., 2022).

Finalmente, se pasa a la destilación que se lleva a cabo a fuego directo en alambique de cobre u olla de barro, cuyo proceso puede incluir el bagazo y así obtener un producto de calidad (Félix-Valdez et al., 2016; NOM-070-SCFI-2016, 2017).

2.6 Diagrama de flujo de proceso

El diagrama de flujo es una herramienta gráfica utilizada en diversos campos de estudio, presenta un grado de complejidad mayor requiriendo el registro de diferentes parámetros como: temperatura, presión y composición del flujo. De igual forma, acompañando el diagrama es necesaria la presentación de una tabla de balance de materiales que muestre la variación en composición de todas y cada una de las corrientes.

Estas representaciones visuales, compuestas por símbolos y líneas conectadas, permiten comunicar de manera clara y concisa la secuencia de pasos o decisiones involucradas en un proceso específico (Wang et al., 2017).

2.7 Fundamento de los balances de materia

El balance de materia es un método matemático fundamentado por la Ley de conservación de la materia atribuida a Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794), estableciendo que “la materia no crea ni se destruye, sólo se transforma”; de esta manera en un sistema de producción la suma de materia de entrada es igual a la suma de materia de salida (Cuellar Mosqueda et al., 2019). Cualquier producto o servicio en el que se requiera analizar o diseñar un nuevo procedimiento, no se puede considerar completo hasta que se haya demostrado que las cantidades de entrada y salida en todo el proceso y en cada unidad individual cumplen con las ecuaciones de equilibrio (Daoud et al., 2021; DFIE, 2023).

2.8 Fundamento de los balances de energía

El balance de energía se basa en el cumplimiento de la ley de la conservación de la energía, enunciada por Julius von Mayer (1814 – 1878), establece que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma; es decir, que la energía puede cambiar en distintas formas, incluso transmitirse de un cuerpo a otro, pero permanece constante (DFIE, 2023). De esta manera, Albert Einstein (1879 – 1955) constituye la ley de la conservación de la materia: materia-energía como “La cantidad de masa-energía que manifiesta un determinado espacio-tiempo es constante en todo el universo”, expresada matemáticamente como:

$$E = mc^2$$

Donde:

E = energía

m = masa

c = velocidad de la luz

Por lo anterior el balance de energía en un sistema cerrado se conserva, y en un sistema abierto, la energía que entra es igual a la energía que sale más cualquier cambio en la energía almacenada en el sistema (Krattenmacher et al., 2019). Para un sistema cerrado, la ecuación del balance de energía es:

$$\textit{entrada} - \textit{salida} = \textit{acumulada}$$

En el caso de un sistema abierto, la ecuación se modifica para incluir los términos de transferencia de energía y trabajo realizado:

$$\textit{entrada} - \textit{salida} + \textit{transferencia} + \textit{trabajo} = \textit{acumulada}$$

2.9 Análisis del ciclo de vida: Un enfoque para evaluar la sostenibilidad de productos y procesos

El Análisis del Ciclo de Vida permite cuantificar los impactos ambientales de productos, materiales, procesos, actividades o servicios de una forma integral (Lira, 2019). En la actualidad se ha convertido en una herramienta fundamental para la toma de decisiones sustentables en diferentes sectores industriales, como la alimentación, la construcción, la energía y el transporte permitiendo identificar puntos críticos en las etapas de producción y con ello buscar oportunidades de mejora en términos de eficiencia energética, reducción de emisiones y minimización de residuos (Koroneos et al., 2005).

La metodología del análisis del ciclo de vida se basa en la norma ISO 14040 y 14044. Esta norma internacional comprende los fundamentos y marco de referencia del análisis del ciclo de vida (ACV) y el análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) (ISO, 2006b; Lira, 2019).

El ACV se divide en cuatro etapas principales de acuerdo con lo establecido por la ISO 14040 y 14044:

- 1) **Definición del objetivo y alcance:** Declara el propósito y define los límites del sistema.

- 2) **Análisis de inventario:** Es la estructura del ACV que define la unidad funcional, la recolección de datos del proceso y la implementación de una metodología para efectuar el cálculo de impactos.
- 3) **Evaluación de impacto:** Se considera obligatorio la selección de las categorías de impacto, cálculo de los indicadores y resultado de impacto por categoría.
- 4) **Interpretación de resultados:** Esta fase implica el análisis de sensibilidad, formulación de conclusiones y recomendaciones para asegurar que las tres primeras fases sean coherentes entre sí y los resultados sean verídicos.

Esta herramienta ha sido relevante en los últimos años debido a la creciente preocupación por la sostenibilidad y el impacto ambiental de las actividades humanas (Acero et al., 2016; Gazulla et al., 2010). En algunos estudios realizados en bebidas destiladas como el whisky sueco de malta identificaron puntos críticos en el proceso y se generaron distintas mejoras medioambientales en la cadena de producción (Eriksson et al., 2016). En el caso del sotol artesanal se identificó que en las etapas de molienda y embotellado generaron mayor impacto ambiental en la producción de una botella de 750 ml (Madrid-Solórzano et al., 2021).

3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN ARTESANAL DE MEZCAL

Resumen

Durante la producción artesanal de mezcal, se generan residuos que impactan al medio ambiente. Actualmente, este es un tema poco explorado en esta bebida. En estudios realizados en otras bebidas destiladas, se ha evaluado el impacto ambiental que generan durante su producción; empleado extensamente la herramienta Análisis del Ciclo de Vida. Bajo esta idea, se abordó como objetivo analizar la línea de producción artesanal de mezcal en cuatro escenarios, que resultaron de la combinación de especies de maguey procesadas y tipo de embotellado del producto final; mediante herramientas de ingeniería de diagnóstico y Análisis del Ciclo de Vida. Los datos se recopilaron en una fábrica artesanal para los balances de materia y energía. Estos balances fueron sujetos a la metodología línea base CML 2001, en sus 10 categorías de impacto ambiental más utilizadas para el Análisis del Ciclo de Vida. Los hallazgos indican que cada una de las etapas requeridas para el procesamiento del mezcal afecta significativamente el ecosistema marino. Las etapas de cocimiento, destilación y embotellado son las de mayor impacto ambiental. Los mezcales envasados en botellas de vidrio generan 2 veces más impacto que los mezcales envasados en botella de plástico PET de 1 litro.

“Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Yesenia Manilla Tellez
Director de Tesis: Dr. Artemio Pérez López”.

Palabras clave: *Mezcal artesanal, impacto ambiental, ACV (Análisis del Ciclo de Vida), Balance de Materia y Energía.*

ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE ARTISANAL PROCESS OF MEZCAL PRODUCTION

Abstract

During the artisanal production of mezcal, waste is generated, which impacts the environment. Currently, this is a topic that has been scarcely explored in relation to this beverage. Studies on other distilled beverages have assessed the environmental impact generated during their production, extensively utilizing the Life Cycle Assessment tool. With this notion in mind, the objective was to analyze the artisanal mezcal production line in four scenarios, resulting from the combination of processed agave species and the type of bottling for the final product, using diagnostic engineering tools and Life Cycle Assessment. Data was gathered at an artisanal factory for material and energy balances. These balances were analyzed using the CML 2001 baseline methodology, considering its 10 most commonly used environmental impact categories for Life Cycle Assessment. The findings indicate that each stage required for mezcal processing significantly affects the marine ecosystem. The cooking, distillation, and bottling stages have the highest environmental impact. Mezcals packaged in glass bottles generate twice as much impact as mezcals packaged in 1-liter PET plastic bottles.

Keywords: *Artisanal Mezcal, Environmental Impact, LCA (Life Cycle Assessment), Material and Energy Balance.*

"Master's Thesis in Science, Master's in Agri-Food Science and Technology, Autonomous University of Chapingo.

Author: Yesenia Manilla Tellez

Thesis Advisor: Dr. Artemio Pérez López"

3.1 Introducción

El mezcal, una bebida alcohólica destilada originaria de México clasificada de acuerdo con el proceso de fabricación específico en las siguientes categorías: mezcal, mezcal artesanal y mezcal ancestral. Dicha bebida se obtiene a partir del destilado de jugos de cabezas maduras de maguey horneado y fermentado con microorganismos naturales o cultivados (NOM-070-SCFI-2016, 2016).

Existe una gran variedad de mezcales que resultan de la diversidad de especies de agaves empleados. El maguey espadín (*Agave angustifolia*) ocupa el primer lugar en aprovechamiento para la producción, seguido del maguey tobalá (*Agave potatorum*), maguey cuishe (*Agave karwinskii*), maguey verde (*Agave salmiana*), maguey cenizo (*Agave durangensis*), entre otros (COMERCAM, 2023). Estas plantas endémicas en su mayoría silvestres aportan diversos sabores, aromas y perfiles sensoriales al mezcal (Alducin-Martínez et al., 2023).

Recientemente la producción a nivel nacional de mezcal referido a 45 % Alc.Vol. alcanzó 14,165,505 litros; de los cuales el estado de Oaxaca ocupó el primer lugar con una participación del 91.31 % del total de dicha producción. Así mismo, de ese total de producción nacional se registró que el 95.35 % fue de producción artesanal (COMERCAM, 2023).

La producción de mezcal artesanal no solo presenta un impacto cultural y económico, sino también un impacto ambiental. A medida que la producción y venta de mezcal aumenta, también aumenta el consumo de los recursos naturales como: la extracción masiva de agave que puede poner en peligro la biodiversidad y agotar las poblaciones de agave silvestre, el uso de leña como fuente de energía puede contribuir a la deforestación y a la degradación del ecosistema local. Además, la producción de mezcal genera residuos orgánicos, como las fibras de agave después de la extracción del jugo, así como aguas residuales que contienen subproductos de la fermentación que suelen ser desechados al drenaje.

Actualmente, la información disponible al respecto es limitada. La mayor parte de los estudios previos se han enfocado en la propagación, rescate y cultivo de las especies de agaves (Alducin-Martínez et al., 2023), aprovechamiento de los residuos del agave (Bailón-Salas et al., 2022), determinación de los microorganismos que actúan en la fermentación (Torres-Velázquez et al., 2022) y análisis de los compuestos volátiles presentes (Sánchez-Álvarez et al., 2023).

Por lo anterior es importante examinar los efectos que esta producción genera en el entorno natural de la región. A través, de la aplicación del enfoque de ACV, basado en la recopilación de datos sobre el consumo de recursos naturales, las emisiones al medio ambiente y los impactos ambientales asociados en cada etapa de fabricación del mezcal respaldada por la norma internacional ISO 14040 (ISO, 2006a).

En estudios realizados en otras bebidas como el whisky, Eriksson et al. (2016) emplea la herramienta ACV en donde reportó que la vinaza fue la principal fuente de contribución al potencial de calentamiento global (PCG). La producción de botellas, el transporte y cultivo de cebada generó 14.6 kg de dióxido de azufre (SO₂) equivalentes a una botella de 700 ml de whisky.

Otra bebida destilada analizada bajo el ACV es el sotol artesanal, reveló que las etapas de molienda y envasado generaron 4.62 kg de CO₂ equivalentes, lo que representó el 78.04% de las emisiones totales de su producción. Además, el transporte de insumos para la elaboración de la bebida fue una desventaja para los productores, debido a que generó un alto consumo de energía (Madrid-Solórzano et al., 2021).

En vodka se realizó un estudio comparativo de acuerdo con la procedencia de la materia prima empleada para su fabricación y resultado, que el vodka obtenido a partir de productos de panadería caducos generara menor impacto ambiental en todas las categorías consideradas en la producción con respecto al vodka fabricado a partir de trigo cultivado (Bhattacharyya et al., 2019).

Los resultados de dichas investigaciones presentan algunos desafíos medioambientales asociados al proceso de producción de las bebidas destiladas. Sin embargo, cada proceso de producción presenta variantes ligadas con el tipo de materia prima, ubicación geográfica y técnicas de producción de la bebida a fabricar. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue analizar los efectos ambientales asociados con la producción de mezcal artesanal, aplicando la herramienta ACV y balances de materia y energía. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para generar estrategias que reduzcan el impacto ambiental, así como, mejorar la eficiencia energética en el proceso.

3.2 Materiales y métodos

Para analizar los efectos medioambientales y las repercusiones vinculadas a la producción artesanal de mezcal, se empleó el ACV. Este estudio se ajusta a las pautas establecidas por la norma ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006). El ACV abarca cuatro etapas esenciales: a) definición del objetivo y alcance, b) análisis de inventario, c) evaluación del impacto d) interpretación de resultados. Para llevar a cabo la evaluación del ACV, se empleó el software OpenLCA 2.0 © 2023 (GreenDeLTa, 2021), un programa de código abierto especializado en ACV y valoración de sostenibilidad.

3.2.1 Definición del objetivo y alcance

La presente investigación se centró en el estudio del impacto ambiental del proceso artesanal de mezcal en una fábrica con capacidad instalada de dos toneladas de maguey. Pertenece a la organización de productores “Tres magueyes” en San Luis Amatlán, Miahuatlán, Oaxaca (**Figura 4**).



Figura 4. Fábrica de producción artesanal de mezcal perteneciente a “Tres magueyes”, San Luis Amatlán, Miahuatlán, Oaxaca.

Los productores de mezcal “Tres Magueyes” coinciden que aproximadamente 15 kg de biomasa de maguey silvestre equivale a una botella de 1 litro de mezcal con 45 % Alc. Vol. Por lo anterior, la unidad funcional fue una botella de mezcal artesanal de 1 litro con 45 % Alc. Vol. proveniente de maguey silvestre.

Para definir el límite del sistema se consideró el enfoque “de la cuna a la puerta” que abarcó las etapas desde el corte y recolección del maguey hasta el embotellado del mezcal artesanal (**Figura 5**). La producción de materia prima quedó fuera de los límites del sistema debido a que se aprovechó maguey silvestre, el cual se distingue por ser recolectado en áreas naturales, seguido de su cultivo en pequeñas proporciones en diversos entornos rurales. Los equipos no se consideraron insumos, debido a que son parte de los activos fijos de la fábrica; su impacto ambiental se podría evaluar en otros ACV del propio equipo. La fuerza de trabajo humana no se consideró debido a que sólo cuatro personas fueron suficientes para la producción de los dos lotes de maguey. A diferencia de la producción de vino, que requiere un sistema agrícola y mano de obra intensiva (Meneses et al., 2016). Los residuos generados en cada etapa del proceso se

dejaron fuera de los límites del sistema ya que fueron depositados directamente al suelo en espacios cercanos al palenque (Madrid-Solórzano et al., 2021).

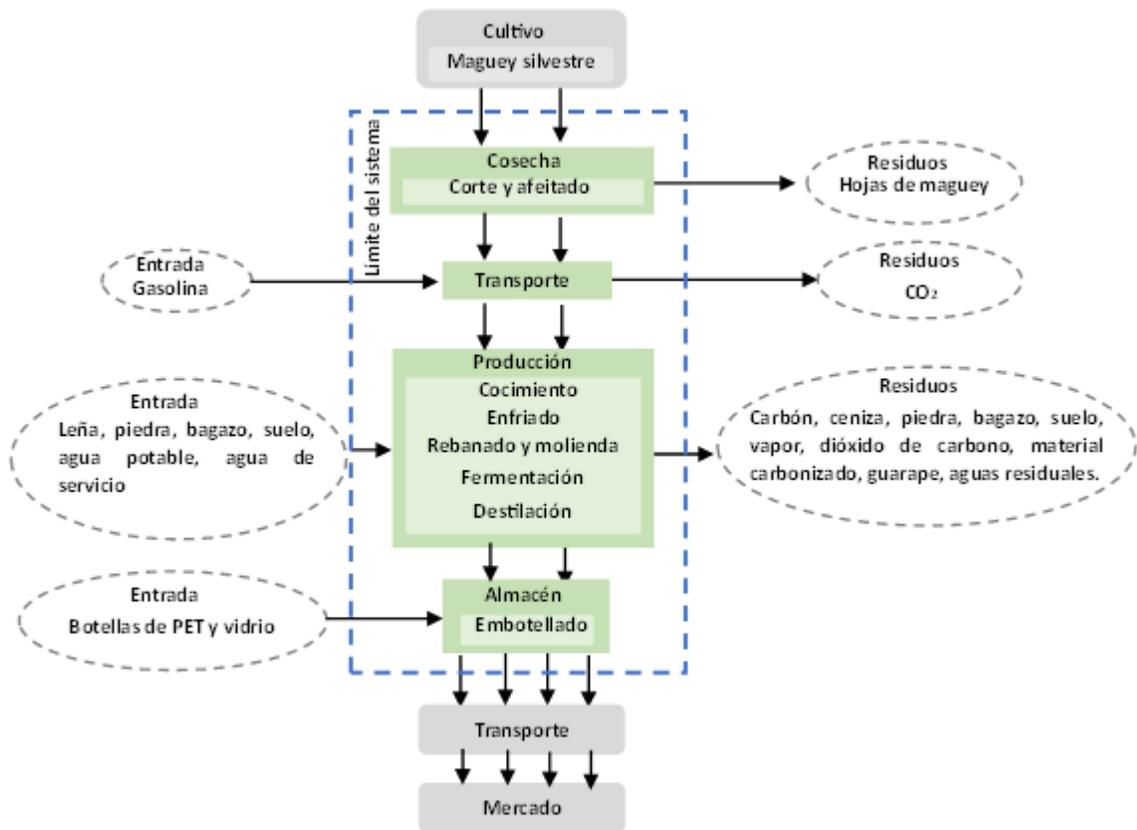


Figura 5. Límite del sistema de producción artesanal de mezcal. Los cuadros en color gris no se adhieren al enfoque “de la cuna a la puerta”.

3.2.1.1 Descripción del proceso artesanal de mezcal

Cultivo de magüey silvestre: En San Luis Amatlán, Miahuatlán, Oaxaca, existe una gran variedad de magüey silvestre que se reproduce de manera natural con ayuda de polinizadores de la región. El magüey empleado en este estudio tenía una maduración entre los 10 - 14 años y se desarrolló en terrenos de laderas orientadas al norte y con suelo pedregoso, esta condición originó que el magüey tepeztate (*Agave marmorata* Roezl) y algunos cuishes (*Agave karwinskii* Zucc.) fueran cortados después de haber brotado el quiote. Illsley (2018), considera que un magüey silvestre debe ser aprovechado a partir de los 10 años, tiempo en que alcanza su madurez.

Cosecha: En la etapa de cosecha no se emplearon equipos con motor de gasolina como mecanismo de corte. Todo el maguey fue cortado y afeitado al instante, el traslado de este se llevó a cabo en un lapso de 2 días en una camioneta NISSAN NP300. Se acopiaron aproximadamente 1.5 toneladas de biomasa de maguey, los km totales recorridos del traslado del campo a la fábrica fueron 15 km.

Cocimiento: Una vez que las piñas de maguey llegaron al palenque se ingresaron al horno de pozo para su cocimiento. Desde el fondo del horno hacia la superficie se colocaron capas de leña de diferente grosor (mayor a menor diámetro). El horno se calentó con leña de mezquite (*Prosopis velutina*) y sobre ella se depositaron capas de piedra procedentes de suelo regosol (conocidas como piedra de loma). Se colocaron las piñas de maguey sobre las piedras al rojo vivo; el productor evaluó el acomodo en función de la especie de maguey. Con capas de bagazo y tierra se evitó la fuga de calor y vapores durante el proceso de cocción. El tiempo de esta etapa fue de siete días.

Enfriado: Después del cocimiento las piñas se retiraron del horno y se colocaron sobre tarimas de madera donde se dejaron reposar durante cuatro días.

Rebanado y molienda: En esta etapa, las piñas de maguey cocidas se cortaron en pequeños trozos utilizando un machete. Una vez que todo el maguey fue troceado pasó a la molienda en donde se empleó un mazo de madera. En esta etapa no se emplearon maquinas ni combustibles, sólo se requirieron de dos jornales de 8 horas cada uno para rebanar y moler el maguey.

Fermentación: El maguey molido se colocó en tanques para iniciar la fermentación, donde se agregó agua en una proporción de 1:1. Para que este proceso se llevara a cabo solo se necesitó cubrir los tanques y de esta manera mantener una temperatura adecuada para proveer un ambiente favorable a los microorganismos nativos que se encontraban presentes, ya que no se agregó ningún otro tipo de levaduras ni azúcares a esta etapa del proceso. El tiempo de fermentación varió, de acuerdo a las especies de maguey procesadas. Para el

caso del ensamble la fermentación duró 4 días, en cambio el tepeztate sólo fue de 2 días y medio.

Destilación: Esta etapa se llevó a cabo en destiladores de cobre que fueron llenados con el maguey fermentado. La olla fue calentada a fuego directo con leña de mezquite, ahí se llevó a cabo la condensación de los alcoholes y aromas del mezcal. En la montera se monitoreó el ingreso de agua con el objetivo de disminuir la temperatura dentro de la olla y evitar la condensación de otros compuestos no deseados en el mezcal. Finalmente, los alcoholes y compuestos aromáticos pasaron por el turbante y el serpentín.

El resultado de los primeros 5 litros fueron la cabeza del mezcal porque se encontró con una graduación > 55 % Alc. Vol., este producto presentó demasiados olores sin presencia de materia sólida e incoloro. Luego se obtuvo el cuerpo del mezcal el cual osciló entre los 55 % Alc. Vol. – 35 % Alc. Vol. (NOM-070-SCFI-2016, 2016). Finalmente, el maestro mezcalero hizo una mezcla de cabeza y cuerpo resultando mezcal de 45 % Alc. Vol.

Envasado: Una vez finalizada la etapa de destilación, el producto fue almacenado en bidones de polietileno. Se dejó reposar por 3 días y se monitoreó el % Alc. Vol. verificando que la graduación del mezcal quedara a 45 % Alc. Vol. El mezcal fue embotellado de manera manual en botellas (PET y vidrio). Finalmente, las botellas fueron selladas y sólo recibieron una etiqueta simple sin decoración alguna en donde especificaba tipo de mezcal, fecha, lugar de producción y % Alc. Vol.

3.2.1.2 Escenarios

En la investigación se plantearon cuatro escenarios diferentes, los cuales se distinguieron por el tipo de maguey empleado para la fabricación del mezcal, así que se denominó “ensamble” a aquel mezcal que contuvo espadín (*Agave angustifolia* Haw.), madrechishe (*Agave karwinskii* Zucc.), bicuishe (*Agave karwinskii* Zucc.), jabalí (*Agave convallis* Trelease) y cucharilla (*Agave dasylirion* Zucc). Así mismo, el mezcal fabricado a partir de maguey tepeztate (*Agave*

marmorata Roezl) se le denominó “tepeztate”. Por otra parte, también se contempló el envasado del producto final por el material de la botella (PET y vidrio). Las cuatro combinaciones fueron: Línea de base (EB-PET), Escenario 1 (TB-PET), Escenario 2 (EB-V) y Escenario 3 (TB-V). Los límites del sistema del ciclo de vida para cada escenario se presentan en la **Figura 6**.

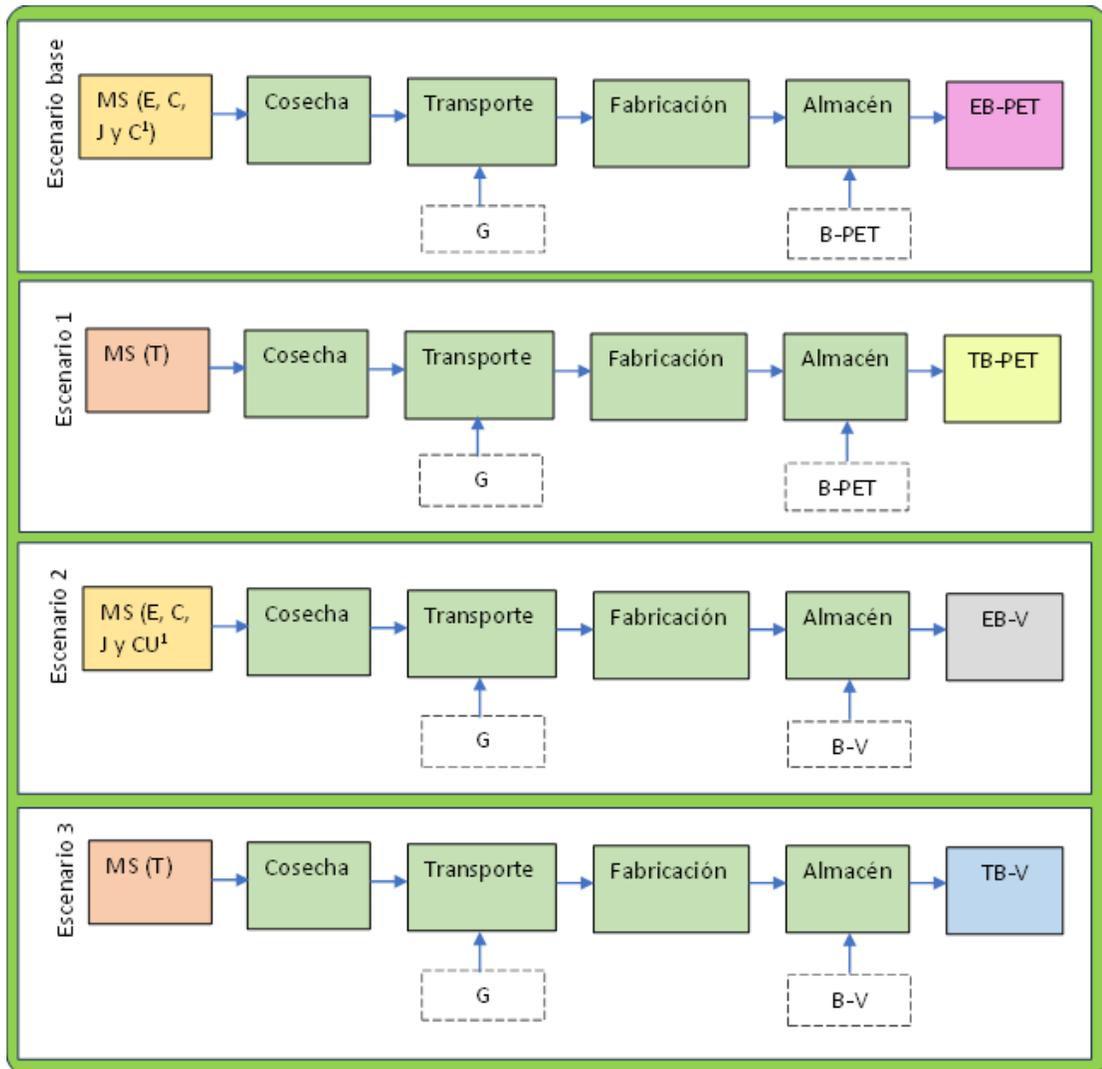


Figura 6. Escenarios del proceso de fabricación de mezcal artesanal.

MS: Maguey silvestre; **E:** espadín; **C:** cuises; **J:** jabalín; **C¹:** cucharilla; **T:** tepeztate; **G:** Gasolina; **B-PET:** Botella de PET; **EB-PET:** Ensamble en botella de PET; **TB-PET:** Tepeztate en botella de PET; **B-V:** Botella de vidrio; **EB-V:** Ensamble en botella de vidrio; **TB-V:** Tepeztate en botella de vidrio.

3.2.2 Fuente de datos

La cuantificación y recopilación de la mayoría de información se fundamentó en datos recopilados *in situ* en una fábrica artesanal en un lapso 30 días; tiempo que duró el proceso de producción del mezcal. Así mismo, la información faltante fue complementada con datos extraídos de fuentes literarias y de la base de datos Ecoinvent versión 3.1 (Boutros et al., 2021).

Para la producción de botellas PET y vidrio, se utilizaron datos provenientes de lo reportado por Boutros et al. (2021), sólo se ajustaron los requerimiento para botellas de 1 litro de capacidad.

3.2.3 Análisis de inventario

La información del proceso artesanal de mezcal tanto de entradas y salidas de cada uno de los escenarios se encuentra resumida en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Datos recopilados en campo para el inventario del ciclo de vida de los cuatro escenarios.

Etapa del proceso	Datos	Unidad	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Cosecha de maguey						
	Espadín	kg	537		537	
	Cuishes	kg	180		180	
	Jabalín	kg	15		15	
	Cucharilla	kg	5		5	
	Tepeztate	kg		777		777
Transporte						
	Combustible fósil	l	22	22	22	22
Palenque						
	Cocimiento	kg	509	427	509	427
	Enfriado	kg	507	424	507	424
	Rebanado y molienda	kg	559	468	559	468
	Fermentación	kg	1104.5	935	1104.5	935
	Destilación	kg	48.5	29	48.5	29
Envasado						
	Botella de PET	l	1	1		
	Botella de vidrio	l			1	1

3.2.4 Evaluación de impacto

La evaluación de impacto ambiental se modeló con el software OpenLCA 2.0 © 2023 (GreenDeLTa, 2023), mediante una comparación a nivel medio utilizando la metodología de línea base CML (Guinee, 2002).

En el nivel medio la metodología evalúa las siguientes categorías de impacto: potencial de agotamiento abiótico (PAA) expresado como equivalente de antimonio (Sb-eq); potencial de acidificación (PA) expresado en equivalentes de dióxido de azufre (SO₂-eq); potencial de eutrofización (PE) expresado como equivalente de fosfato (PO₄-eq); potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce (PEAAD) expresada en equivalentes de 1,4-DB; potencial de calentamiento global (PCG) expresado como equivalentes de CO₂; potencial de toxicidad humana (PTH) expresada en equivalentes de 1,4-DB; potencial de ecotoxicidad acuática marina (PEAM) expresada en equivalentes de 1,4-DB; potencial de agotamiento de la capa de ozono (PACO) expresado como equivalente de triclorofluorometano (CFC-11 eq); potencial de creación de ozono fotoquímico (PCOF) expresado como equivalente de etileno (C₂H₄-eq) y ecotoxicidad terrestre (ET) expresado como 1,4-diclorobenceno equivalente (DCB-eq).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Impacto ambiental generado por el proceso de producción artesanal de mezcal ensamble y mezcal tepeztate

En la **Figura 7** se indican las categorías de impacto ambiental y la contribución de la producción de ambos mezcales en donde se aprecia ver que el mezcal tepeztate contribuyó con valores altos en las diferentes categorías, con respecto al mezcal ensamble. Esto podría deberse a diferencias en los procesos de producción y el tipo maguey empleado.

En las categorías de impacto PCG y PACO se observan contribuciones elevadas por parte de los dos mezcales. El impacto en la categoría PCG podría estar asociado en gran medida a las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de las etapas de cocimiento y destilación; mientras que para la categoría PACO, podría estar indicando que la producción de mezcal depende en gran medida de la energía derivada de combustibles fósiles empleada en el traslado de la materia prima a la fábrica de mezcal. Por otro lado, PEAAD, PTH y PEAM resultaron ser las categorías que menor impacto presentaron por parte

de los dos mezcales; lo que podría indicar que dichas bebidas no representan ser un riesgo potencial para la salud y el consumo humano.

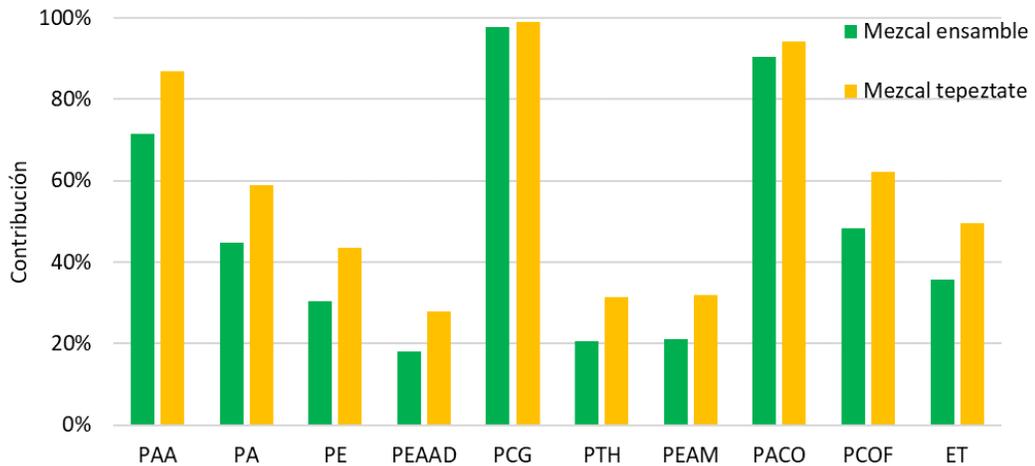


Figura 7. Porcentaje de contribución de la producción artesanal de mezcal ensamble y mezcal tepeztate evaluado en las diferentes categorías de impacto.

***PAA:** potencial de agotamiento abiótico; **PA:** potencial de acidificación; **PE:** potencial de eutrofización; **PEAAD:** potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; **PCG:** potencial de calentamiento global; **PTH:** potencial de toxicidad humana; **PEAM:** potencial de ecotoxicidad acuática marina; **PACO:** potencial de agotamiento de la capa de ozono; **PCOF:** potencial de creación de ozono fotoquímico; **ET:** ecotoxicidad terrestre.*

3.3.1.1 Etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble que contribuyen al impacto ambiental

En la **Figura 8** se observan las etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble que generaron impacto en las diferentes categorías evaluadas.

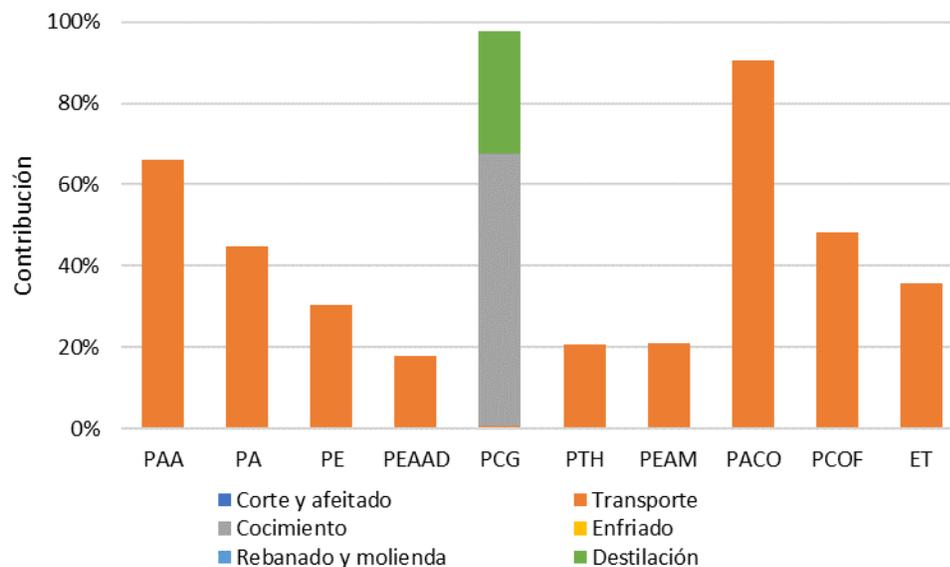


Figura 8. Impacto de las etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble en las diferentes categorías.

PAA: potencial de agotamiento abiótico; **PA:** potencial de acidificación; **PE:** potencial de eutrofización; **PEAAD:** potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; **PCG:** potencial de calentamiento global; **PTH:** potencial de toxicidad humana; **PEAM:** potencial de ecotoxicidad acuática marina; **PACO:** potencial de agotamiento de la capa de ozono; **PCOF:** potencial de creación de ozono fotoquímico; **ET:** ecotoxicidad terrestre.

La etapa del proceso que contribuyó en todas las categorías fue el transporte. El cual impactó a las categorías PAA y PACO por más del 50 %, lo que señala que el automóvil empleado en esta etapa originó un impacto ambiental relevante. Sin embargo, la categoría PCG se observa mayormente impactado por la etapa de cocimiento y destilación que en conjunto impacta con un 97 % de la contribución total generada por las distintas etapas del proceso. Esto indica que dichas etapas tienen un alto impacto en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂).

3.3.1.2 Etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble que contribuyen al impacto ambiental

En la producción del mezcal tepeztate el transporte es la etapa que más contribuye al impacto ambiental en todas las categorías. Representa un 77 % del

impacto en la categoría PAA y un 59 % en la categoría PA. Esto es muy similar a lo obtenido en el análisis del ciclo de vida del mezcal tepeztate ya que resultó que el transporte de materias primas genera un impacto ambiental significativo en estas categorías.

Las etapas de cocimiento y destilación resaltan como principales fuentes de contribución en la categoría PCG, participando con un 57 % el cocimiento y un 42 % la destilación. De acuerdo con el porcentaje de contribución por parte de dichas etapas, se podrían considerar prácticas más sostenibles, como la gestión de residuos, la eficiencia energética y la reducción de emisiones de sustancias perjudiciales en la producción de ambos mezcales (**Figura 9**).

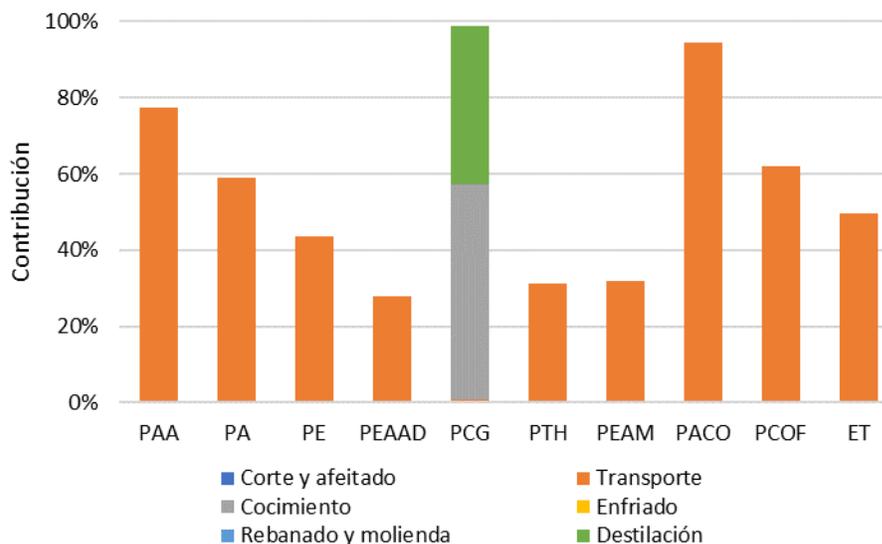


Figura 9. Impacto de las etapas del proceso artesanal de mezcal ensamble en las diferentes categorías.

PAA: potencial de agotamiento abiótico; PA: potencial de acidificación; PE: potencial de eutrofización; PEAAD: potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; PCG: potencial de calentamiento global; PTH: potencial de toxicidad humana; PEAM: potencial de ecotoxicidad acuática marina; PACO: potencial de agotamiento de la capa de ozono; PCOF: potencial de creación de ozono fotoquímico; ET: ecotoxicidad terrestre.

3.3.2 Contribución de los escenarios al Impacto ambiental

La **Tabla 2** muestra los resultados totales del análisis del ciclo de vida en los cuatro escenarios. Los resultados se analizan a continuación por categoría de

impacto, centrándose en la comparación entre el escenario base respecto a los otros escenarios.

Tabla 2. Resultados el análisis del ciclo de vida en los cuatro escenarios.

Categorías de impacto	Unidad	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
PAA	kg Sb eq	13.805	20.743	19.682	26.621
PA	kg SO ₂ eq	0.002	0.003	0.008	0.009
PE	kg PO ₄ --- eq	0.000	0.001	0.001	0.001
PEAAD	kg 1,4-DB eq	0.063	0.072	0.152	0.161
PCG	kg CO ₂ eq	9.893	20.613	10.502	21.223
PTH	kg 1,4-DB eq	0.119	0.137	0.546	0.565
PEAM	kg 1,4-DB eq	200.602	232.643	1237.479	1269.520
PACO	kg CFC-11 eq	0.000	0.000	0.000	0.000
PCOF	kg C ₂ H ₄ eq	0.000	0.000	0.000	0.000
ET	kg 1,4-DB eq	0.000	0.001	0.001	0.001

PAA: potencial de agotamiento abiótico; PA: potencial de acidificación; PE: potencial de eutrofización; PEAAD: potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; PCG: potencial de calentamiento global; PTH: potencial de toxicidad humana; PEAM: potencial de ecotoxicidad acuática marina; PACO: potencial de agotamiento de la capa de ozono; PCOF: potencial de creación de ozono fotoquímico; ET: ecotoxicidad terrestre.

3.3.2.1 Potencial de agotamiento abiótico

El PAA fue la categoría de impacto diferencias significativas entre el escenario base y el resto de los escenarios. De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 2, el valor del PAA del escenario 1 y 2 fue de aproximadamente 7 kg Sb-eq más, con respecto al valor de referencia correspondiente al escenario base. Sin embargo, el escenario 3 generó 26 kg Sb-eq que resultó ser el impacto más alto con respecto a todos los escenarios.

3.3.2.2 Potencial de calentamiento global

Como se muestra en la Tabla 2, todos los escenarios analizados pueden proporcionar una reducción en la categoría de PCG en comparación con el valor de referencia. Sin embargo, a pesar de ser un proceso completamente artesanal el impacto en esta categoría de manera general fue alta. La producción de mezcal tepeztate y su envasado en botella de vidrio generó tres veces más el impacto generado por el escenario base, algo similar ocurrió con el escenario 1.

Esta contribución estuvo directamente asociada a los insumos necesarios para la fabricación de las botellas. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Boutros et al. (2021) quienes reportan que las botellas de vidrio por su composición y demanda de fuentes de energía para su fabricación se vuelven fuentes de mayor impacto si son de un uso. Ferrara et al. (2023) sugiere que los impactos podrían reducirse mediante el reciclado de las botellas.

3.3.2.3 Potencial de ecotoxicidad acuática marina

Cada una de las etapas del procesamiento artesanal del mezcal afecta significativamente al ecosistema marino. Los escenarios 2 y 3 indican un alto impacto en la categoría PEAM con respecto al escenario base. Ciertamente esto se debe al impacto que generó el mezcal tepeztate en el proceso de fabricación y a los insumos requeridos para fabricar una botella de vidrio. PEAM se considera importante en este estudio porque indica cómo las sustancias tóxicas se generaron en el aire, agua, y suelo, donde el agua es escasa y el suelo erosionado abunda.

A todo lo anterior se propone identificar las causas subyacentes de estas diferencias para desarrollar estrategias de producción más sostenibles y reducir el impacto ambiental en las categorías más críticas.

3.3.3 Comparación del análisis del ciclo de vida en los cuatro escenarios

Se han realizado estudios de ACV en bebidas destiladas artesanales (Madrid-Solórzano et al., 2021). Así que comparar los resultados del presente estudio con los de la literatura no es fácil porque las bebidas son distintas por fuente de materia prima y por los procesos de producción. Además, los objetivos, el alcance, la metodología de evaluación del impacto del ciclo de vida de esos estudios varían ampliamente. En consecuencia, los resultados de impacto ambiental del presente estudio se pueden comparar con los obtenidos en otros estudios utilizando diferentes materias primas, incluyendo bebidas no destiladas (Amienyo et al., 2013; Boutros et al., 2021).

3.3.3.1 Escenario base

En el escenario base, el transporte es la etapa con el impacto ambiental más significativo en las categorías de PAA y PA, contribuyendo con un 66% y 45% respectivamente. La destilación también tiene un impacto importante en la categoría de PCG con un 30% de contribución. El envasado contribuye significativamente a varias categorías, como el PA y PE.

En general, el escenario base muestra un impacto ambiental relevante en múltiples categorías, pero el transporte es la etapa con la contribución más alta (Figura 10).

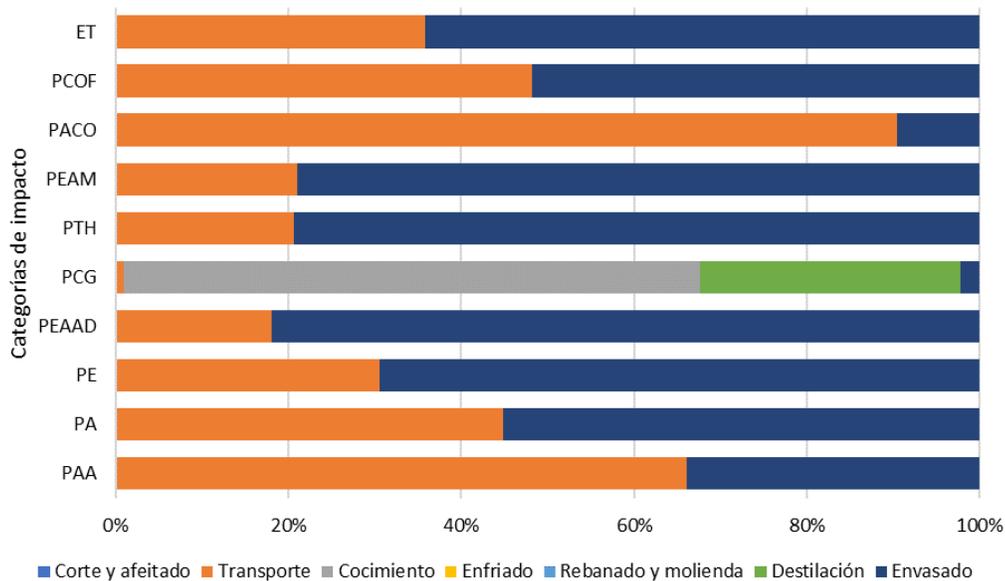


Figura 10. Escenario base.

PAA: potencial de agotamiento abiótico; PA: potencial de acidificación; PE: potencial de eutrofización; PEAAD: potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; PCG: potencial de calentamiento global; PTH: potencial de toxicidad humana; PEAM: potencial de ecotoxicidad acuática marina; PACO: potencial de agotamiento de la capa de ozono; PCOF: potencial de creación de ozono fotoquímico; ET: ecotoxicidad terrestre.

3.3.3.2 Escenario 1

En este escenario el transporte sigue siendo la etapa con el impacto más alto en las categorías de PAA y PA, con un 77% y 59% respectivamente. La destilación

también tiene un impacto en la categoría de PCG con un 42% de contribución. Aunque el envasado tiene un impacto en algunas categorías, su contribución es menor en comparación con el escenario base (**Figura 11**). En este escenario, el transporte y la destilación continúan siendo las etapas con impacto ambiental relevante.

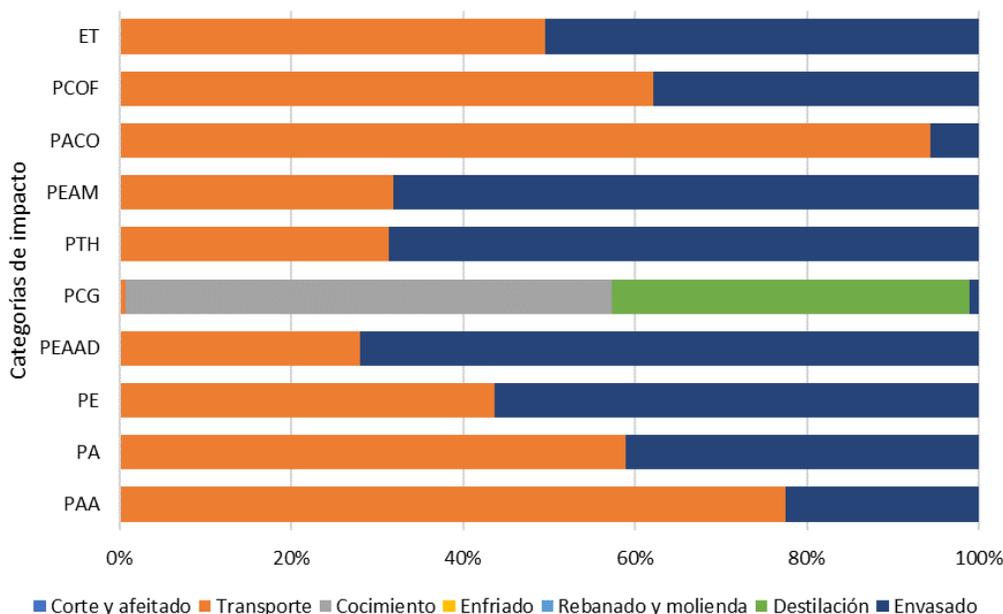


Figura 11. Escenario 1.

PAA: potencial de agotamiento abiótico; PA: potencial de acidificación; PE: potencial de eutrofización; PEAAD: potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; PCG: potencial de calentamiento global; PTH: potencial de toxicidad humana; PEAM: potencial de ecotoxicidad acuática marina; PACO: potencial de agotamiento de la capa de ozono; PCOF: potencial de creación de ozono fotoquímico; ET: ecotoxicidad terrestre.

3.3.3.3 Escenario 2

Se observa un cambio significativo en la distribución del impacto ambiental. La destilación y el transporte ya no son las etapas con la contribución más alta.

La destilación sigue teniendo un impacto importante en la categoría de PCG con un 28% de contribución. El cocimiento se convierte en la etapa más relevante en las categorías de PA, PE, PEAAD, PTH, y ET. El envasado también tiene un impacto significativo en estas categorías.

En este escenario, el cocimiento y el envasado tienen una influencia más marcada en el impacto ambiental (**Figura 12**).

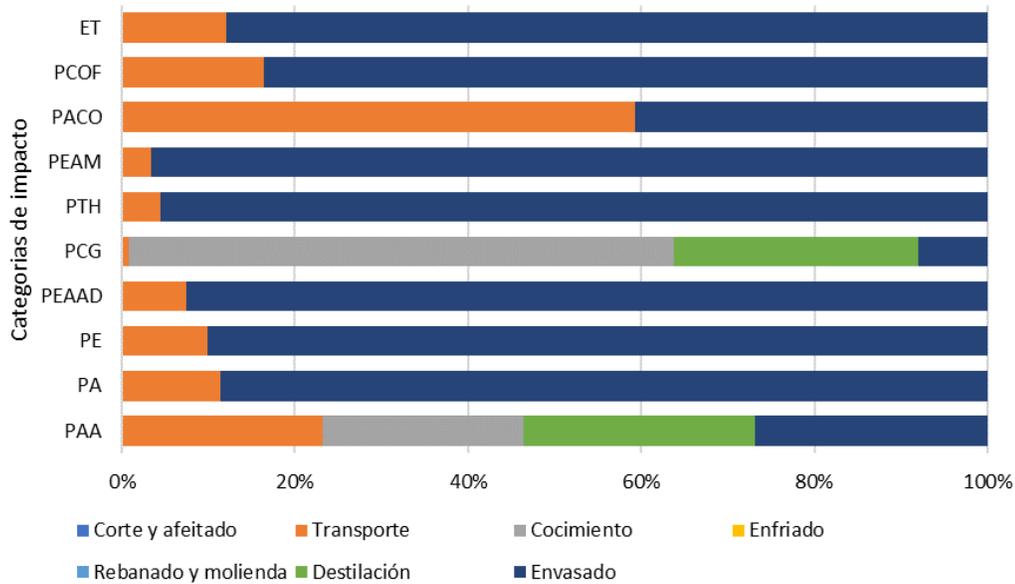


Figura 12. Escenario 2.

PAA: potencial de agotamiento abiótico; PA: potencial de acidificación; PE: potencial de eutrofización; PEAAD: potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; PCG: potencial de calentamiento global; PTH: potencial de toxicidad humana; PEAM: potencial de ecotoxicidad acuática marina; PACO: potencial de agotamiento de la capa de ozono; PCOF: potencial de creación de ozono fotoquímico; ET: ecotoxicidad terrestre.

3.3.3.4 Escenario 3

El escenario 3 muestra similitudes con el escenario base en términos de distribución del impacto ambiental. El transporte sigue siendo la etapa con la contribución más alta en las categorías de PAA y PA. La destilación sigue teniendo un impacto importante en la categoría de PCG con un 40% de contribución.

Aunque el envasado tiene un impacto en varias categorías, su contribución es menor en comparación con otros escenarios. En este escenario, el transporte y la destilación siguen siendo etapas con impacto ambiental relevante, al igual que en el escenario base (**Figura 13**).

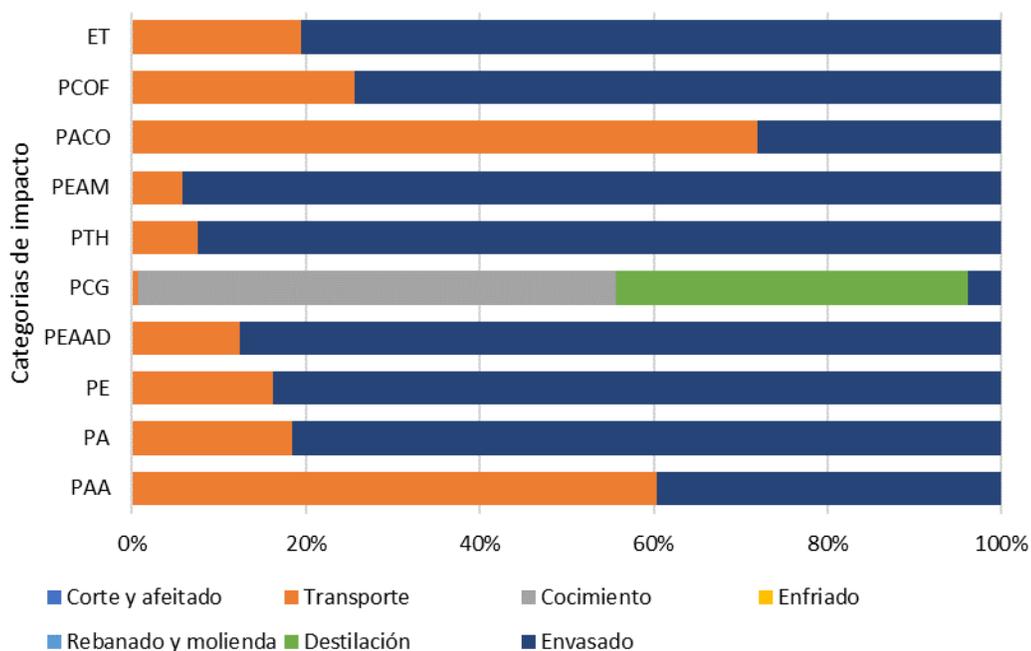


Figura 13. Escenario 3.

PAA: potencial de agotamiento abiótico; PA: potencial de acidificación; PE: potencial de eutrofización; PEAAD: potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; PCG: potencial de calentamiento global; PTH: potencial de toxicidad humana; PEAM: potencial de ecotoxicidad acuática marina; PACO: potencial de agotamiento de la capa de ozono; PCOF: potencial de creación de ozono fotoquímico; ET: ecotoxicidad terrestre.

3.3.4 Principales categorías impactadas por los cuatro escenarios

La **Figura 14** indica las categorías mayormente impactadas por cada escenario con respecto al escenario base. Como se observa en la figura todos los escenarios impactan significativamente la categoría PEAM y esto podría deberse a la presencia de sustancias o emisiones en el proceso de producción que tienen el potencial de ser tóxicas para los organismos marinos.

El escenario base muestra porcentajes medios con respecto a los demás escenarios, en cambio el escenario 1 a pesar de presentar el porcentaje de contribución más baja en la categoría PEAM, en las demás categorías resulta tener los porcentajes de contribución más altos y esto debido a las emisiones de CO₂ que genera en su producción y las prácticas de producción empleadas.

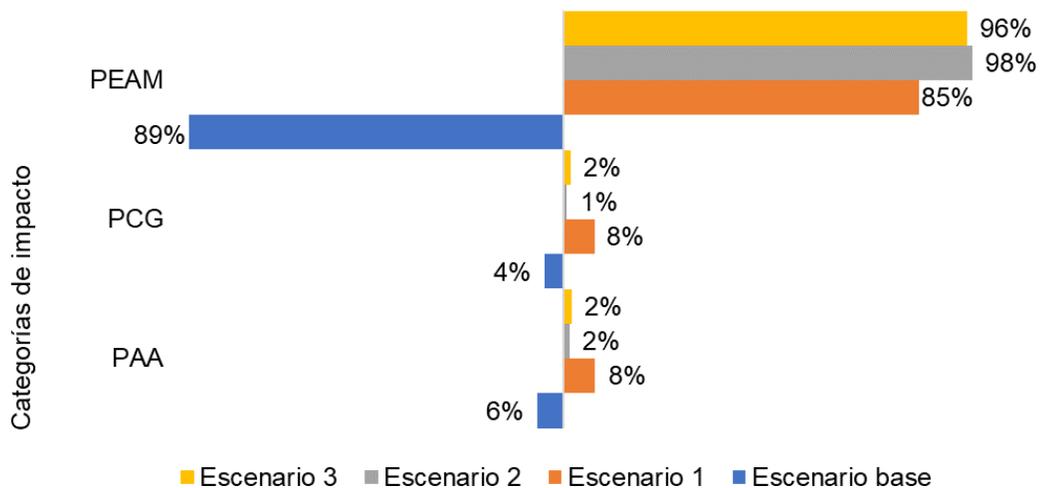


Figura 14. Contribución de los diferentes escenarios en tres categorías de impacto más relevantes para el estudio.

3.3.5 Comparación con literatura

En esta investigación se halló que la etapa de transporte, cocimiento, destilación y envasado en el proceso artesanal de mezcal fueron las que mayor impacto generaron; de acuerdo con investigaciones realizadas en bebidas destiladas, se ha reportado que la etapa de transporte de la materia prima es un punto crítico en la producción de cada bebida destilada (Madrid-Solórzano et al., 2021). El envasado también forma parte de las etapas que mayormente impactan las diferentes categorías evaluadas sin importar cual metodología se emplee para el análisis del ciclo de vida en las bebidas destiladas (Eriksson et al., 2016).

En la **Tabla 3** se presenta el aporte de las emisiones de CO₂ de diferentes bebidas destiladas.

Tabla 3. Emisiones de CO₂ reportadas en bebidas destiladas.

Bebida destilada	Presentación	Emisiones kg CO ₂ eq	Referencia
Mezcal ensamble (B-PET)	1 l	9.89	Manilla et al., 2023
Mezcal tepeztate (B-PET)	1 l	20.61	Manilla et al., 2023
Mezcal ensamble (B-V)	1 l	10.5	Manilla et al., 2023
Mezcal tepeztate (B-V)	1 l	21.22	Manilla et al., 2023
Sotol artesanal	750 ml	5.92	Solórzano et al., 2021
Whisky	750 ml	2.25	Eriksson et al., 2016

B-PET: botella de PET; **B-V:** botella de vidrio

Un litro de mezcal envasado en botella de vidrio puede reducir su impacto sobre el PCG, empleando botellas de material reciclado y que sean retornables. De acuerdo con Boutros et al. (2021) el proceso de fabricación de botellas de vidrio generalmente implica la extracción de materias primas. Las botellas de vidrio podrían ser reciclables lo que originaría una reducción en términos de consumo de energía y de los recursos. Así mismo, el tipo de transporte origina emisiones de gases de efecto invernadero.

3.4 Conclusiones

Para el análisis del ciclo de vida de la producción artesanal de mezcal, realizado en la presente investigación se consideraron diferentes escenarios y categorías de impacto ambiental, que resultaron valiosas perspectivas sobre las áreas clave de influencia en el impacto ambiental de este proceso. A través de esta evaluación, se identificaron tendencias consistentes en los cuatro escenarios analizados.

El transporte ha surgido como una etapa crítica en todos los escenarios, con una contribución significativa a las categorías de agotamiento de la capa de ozono y potencial de acidificación. La eficacia y la sustentabilidad en el transporte se identifican como un área fundamental para disminuir el impacto ambiental en la producción de mezcal. La preferencia por medios de transporte amigables con el medio ambiente, así como la disminución de distancias de transporte, son tácticas clave.

La destilación resultó ser una etapa con impacto importante en la categoría de potencial de calentamiento global. Esto subraya la necesidad de considerar opciones de eficiencia energética y la posible transición hacia fuentes de energía más limpias en este proceso. El envasado ha tenido un impacto en algunas categorías, su contribución es menor en comparación con otras etapas. No obstante, la preferencia de materiales de envasado sostenibles y la gestión responsable de los residuos siguen siendo prácticas esenciales.

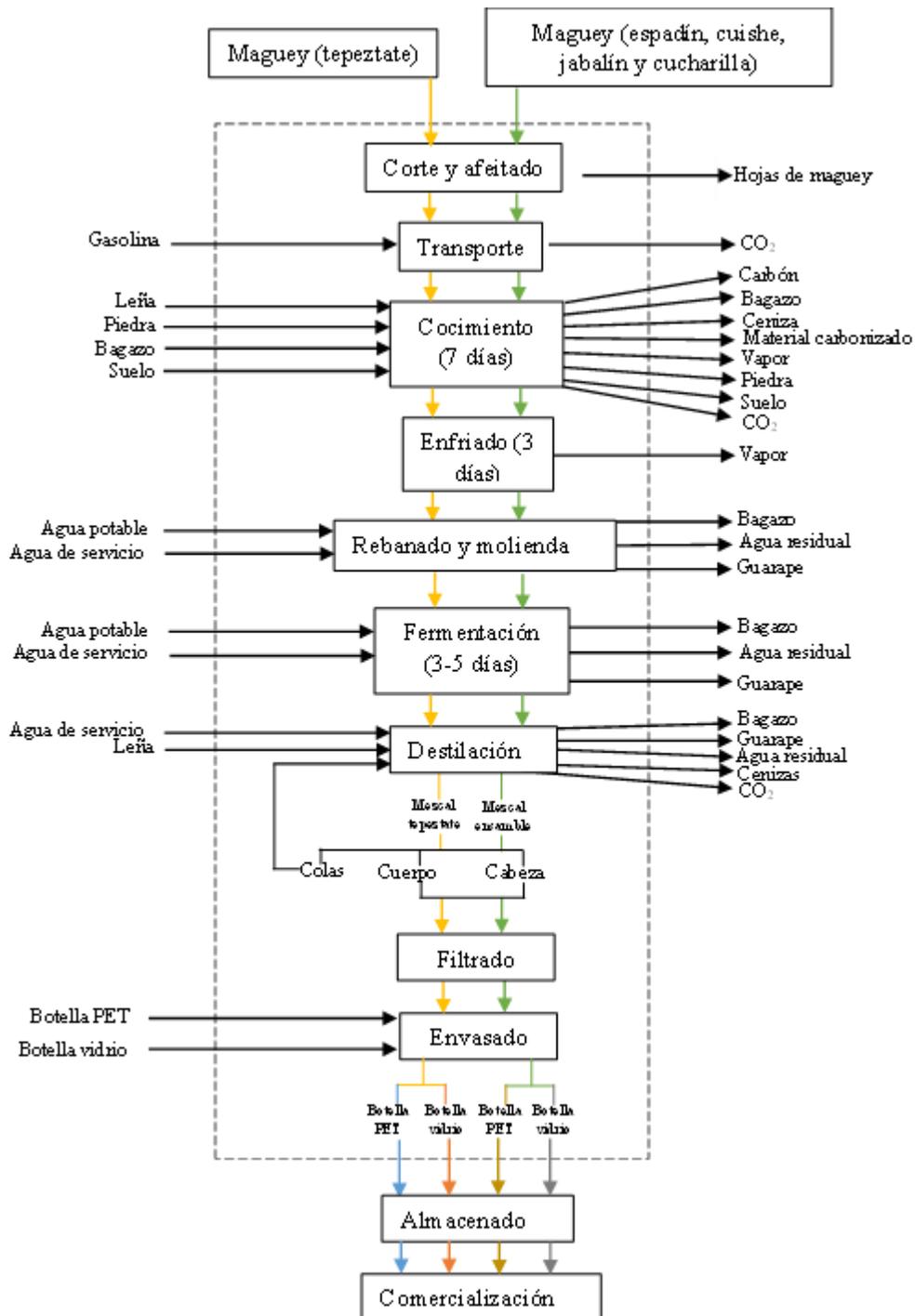
Este análisis del ciclo de vida proporciona una base sólida para la toma de decisiones reveladas y la implementación de medidas definidas que promuevan la sostenibilidad en la producción artesanal de mezcal.

3.5 Agradecimientos

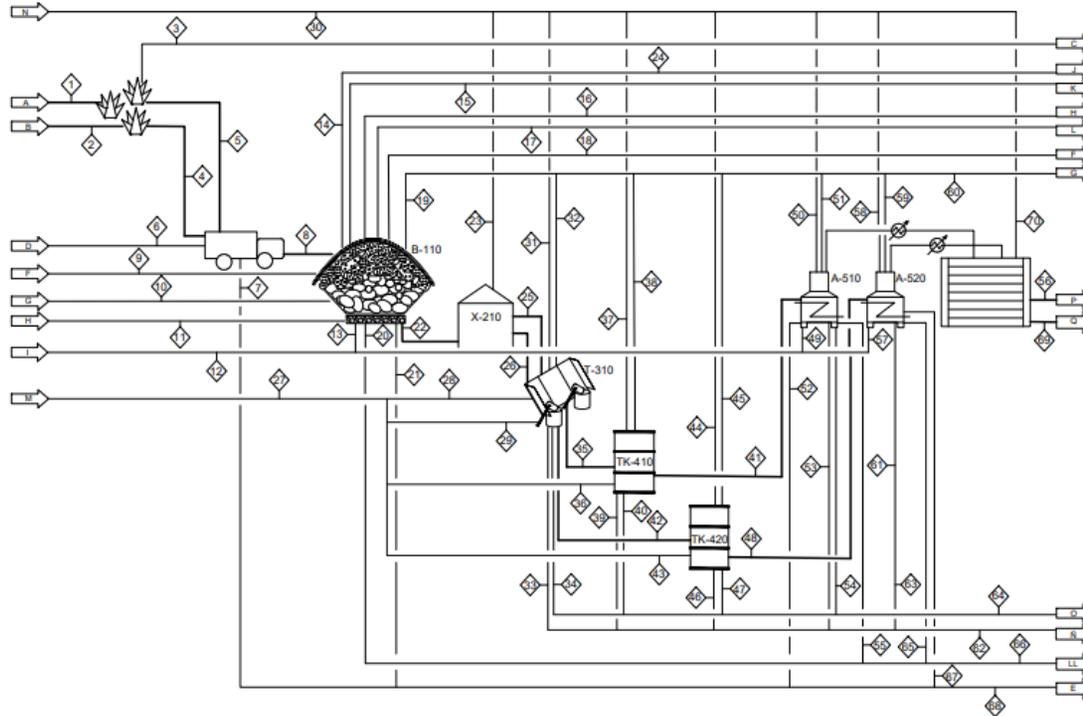
Los autores expresamos un profundo agradecimiento a los productores de Mezcal, C. Jaime Favian Díaz y C. Osvaldo García García de los municipios de Sitio de Xitlapehua y San Luis Amatlán, Miahuatlán, Oaxaca, por su invaluable apoyo y permitirnos la recopilación de datos en sus fábricas de producción. Agradecemos el apoyo financiero proporcionado por la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo a través del proyecto 22023-DTT-62 y al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca Nacional de Maestría Núm. 806878 otorgada a la Ing. Yesenia Manilla Tellez. Así mismo, los autores expresamos nuestra gratitud al Laboratorio de Bioprocesos, del Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria por las facilidades brindadas.

3.6 Apéndices

Apéndice 1. Diagrama de bloques



Apéndice 2. Diagrama de flujo



Cuadro de especificación	
Áreas	Equipo
B-110	Horno con paredes de suelo regosol y capacidad de 3000 kg.
X-210	Almacén con techo de lámina galvanizada y paredes de madera.
T-310	Molino con troncos y mazos de madera de mezquite.
TK-410	Tanque de fermentación con capacidad de 1200 kg.
TK-420	Tanque de fermentación con capacidad de 1200 kg.
A-510	Destilador de cobre con capacidad de 160 kg.
A-520	Destilador de cobre con capacidad de 160 kg.

Nomenclatura:	
A	Magüey tepetzate
B	Magüey espadín, cuishe, jabalín y cucharilla
C	Hojas de magüey
D	Gasolina
E	CO ₂
F	Suelo
G	Bagazo
H	Piedra
I	Leña
J	Vapor
K	Magüey carbonizado
L	Carbón
LL	Cenizas
M	Agua potable
N	Agua de servicio
Ñ	Guarape
O	Agua residual
P	Mezcatepepate
Q	Mezcal ensamble



Universidad Autónoma Chapingo
Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria

Proceso de elaboración de mezcal artesanal

Elaborado por: Manilla-Tellez, Yesenia; Pérez-López, Artemio;
Miranda-Trujillo, Luis Carlos; Bravo-Sepúlveda, Violeta; Espinosa-Solares, Teodoro.

3.7 Literatura citada

- Acero, A. P., Rodríguez, C., & Changelog, A. C. (2016). *LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*. http://www.openlca.org/files/openlca/Update_info_open
- Alducin-Martínez, C., Ruiz Mondragón, K. Y., Jiménez-Barrón, O., Aguirre-Planter, E., Gasca-Pineda, J., Eguiarte, L. E., & Medellín, R. A. (2023). Uses, Knowledge and Extinction Risk Faced by Agave Species in Mexico. *Plants*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/plants12010124>
- Amienyo, D., Gujba, H., Stichnothe, H., & Azapagic, A. (2013). Life cycle environmental impacts of carbonated soft drinks. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 77–92. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0459-y>
- Arellano Plaza, M., Paez Lerma, J. B., Soto Cruz, N. O., Kirchmayr, M. R., & Gschaedler Mathis, A. (2022). Mezcal Production in Mexico: Between Tradition and Commercial Exploitation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.832532>
- Bailón-Salas, A. M., Ordaz-Díaz, L. A., & Domínguez-Calleros, P. A. (2022). Agave durangensis Vinasse as a Biocide for Forest PestControl. *BioResources*, 17(1), 1285–1300. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2022/01/BioRes_17_1_1285_BailonSalas_OD_Agave_durang_Vinasse_Biocide_Forest_Pest_Control_19517.pdf
- Bhattacharyya, N., Goodell, A., Rogers, S., & Demond, A. (2019). Environmental impacts of wheat-based vodka production using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 231, 642–648. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.226>
- Blumenthal, P., Steger, M. C., Einfalt, D., Rieke-Zapp, J., Bellucci, A. Q., Sommerfeld, K., Schwarz, S., & Lachenmeier, D. W. (2021). Methanol mitigation during manufacturing of fruit spirits with special consideration of novel coffee cherry spirits. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26092585>
- Boutros, M., Saba, S., & Manneh, R. (2021). Life cycle assessment of two packaging materials for carbonated beverages (polyethylene terephthalate vs. glass): Case study for the lebanese context and importance of the end-of-life scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128289>
- COMERCAM. (2023). *INFORME ESTADÍSTICO 2023*. https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/INFORME-2023_PUBLICO.pdf
- Cuellar Mosqueda, S., Gómez Molina, S., Herrán Gonzalez, M., Navarro Salazar, R., Pérez Murillo, J., Rojas Chacón, M., & Urpin Rangel, J. (2019). *CULTURA CIENTÍFICA para la Enseñanza Secundaria*.

<http://hdl.handle.net/20.500.12466/277>

- Daoud, M., Benturki, O., Fontana, S., Rogaume, Y., & Girods, P. (2021). Energy and matter balance of process of activated carbon production from Algerian agricultural wastes: date palm rachis and jujube stones. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *11*, 1535–1554. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00543-w/Published>
- De Feo, G., Ferrara, C., & Minichini, F. (2022). Comparison between the perceived and actual environmental sustainability of beverage packagings in glass, plastic, and aluminium. *Journal of Cleaner Production*, *333*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130158>
- DFIE. (2023). *Materia*. Instituto Politécnico Nacional. https://www.aev.dfie.ipn.mx/Materia_quimica/temas/tema1/intro1.html
- Eriksson, O., Jonsson, D., & Hillman, K. (2016). Life cycle assessment of Swedish single malt whisky. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.050>
- Félix-Valdez, L. I., Vargas-Ponce, O., Cabrera-Toledo, D., Casas, A., Cibrian-Jaramillo, A., & de la Cruz-Larios, L. (2016). Effects of traditional management for mescal production on the diversity and genetic structure of *Agave potatorum* (Asparagaceae) in central Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *63*(7), 1255–1271. <https://doi.org/10.1007/s10722-015-0315-6>
- Ferrara, C., Migliaro, V., Ventura, F., & De Feo, G. (2023). An economic and environmental analysis of wine packaging systems in Italy: A life cycle (LC) approach. *Science of the Total Environment*, *857*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159323>
- Gazulla, C., Raugei, M., & Fullana-I-Palmer, P. (2010). Taking a life cycle look at crianza wine production in Spain: Where are the bottlenecks? *International Journal of Life Cycle Assessment*, *15*(4), 330–337. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0173-6>
- González Seguí, H. O., Hernández López, J. D. J., & Giersiepen, J. H. (2020). Methanol: Tolerances and Requirements in Norms for Mezcal and Agave Drinks. *Revista Iberoamericana de Viticultura Agroindustria y Ruralidad*, *7*(19), 1–21. <https://doi.org/10.35588/rivar.v7i19.4246>
- GreenDeLTa. (2021). *openLCA*. GreenDeLTa. <https://www.openlca.org/>
- GreenDeLTa. (2023). *openLCA*. GreenDeLTa. <https://www.openlca.org/>
- Guinee, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *7*(5). <https://doi.org/10.1007/bf02978897>
- Illsley Granich, C., Torres Gracia, I., Hernández López, J. de J., Morales Moreno, P., Varela Álvarez, R., Ibáñez Couch, I., & Nava Xinol, H. (2018). *Manual de*

- manejo campesino de magueyes mezcaleros forestales* (J. Acosta González (ed.)). 2018. <https://www.researchgate.net/publication/328469804>
- ISO. (2006a). *Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework*. http://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_14040-2006.pdf
- ISO. (2006b). *Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework* (pp. 1–28). http://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_14040-2006.pdf
- Koroneos, C., Roumbas, G., Gabari, Z., Papagiannidou, E., & Moussiopoulos, N. (2005). Life cycle assessment of beer production in Greece. *Journal of Cleaner Production*, 13(4), 433–439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.09.010>
- Krattenmacher, N., Thaller, G., & Tetens, J. (2019). Analysis of the genetic architecture of energy balance and its major determinants dry matter intake and energy-corrected milk yield in primiparous Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 102(4), 3241–3253. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15480>
- Lira, A. . C. M. M. y V. S. R. S. (2019). *¿Qué es el análisis de ciclo de vida? Unidades de Apoyo para el Aprendizaje*. CUAED / Facultad de Arquitectura UNAM. https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/ea610b9e-69fd-49af-acdb-fc26d05b3e6a/analisis_de_ciclo_de_vida/index.html
- Madrid-Solórzano, J. M., García-Alcaraz, J. L., Macías, E. J., Cámara, E. M., & Fernández, J. B. (2021). Life Cycle Analysis of Sotol Production in Mexico. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.769478>
- Meneses, M., Torres, C. M., & Castells, F. (2016). Sensitivity analysis in a life cycle assessment of an aged red wine production from Catalonia, Spain. *Science of the Total Environment*, 562, 571–579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.083>
- NOM-070-SCFI-2016. (2016). *NORMA Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones* (pp. 1–17). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/559353/NOM-070-SCFI-2016_Bebidas_alcoholicas-Mezcal-Especificaciones.pdf
- NOM-070-SCFI-2016. (2017). *NORMA Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones*. (p. 17). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/559353/NOM-070-SCFI-2016_Bebidas_alcoholicas-Mezcal-Especificaciones.pdf
- Pérez Hernández, E., Chávez Parga, M. del C., & González Hernández, J. C. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1). <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>
- Sánchez-Álvarez, A., Luna-Moreno, D., Silva-Hernández, O., & Rodríguez-

- Delgado, M. M. (2023). Application of SPR Method as an Approach to Gas Phase Sensing of Volatile Compound Profile in Mezcal Spirits Conferred by Agave Species. *Chemosensors*, 11–70. <https://doi.org/10.3390/chemosensors>
- Torres-Velázquez, D. S., Rojas-Contreras, J. A., Soto-Cruz, N. O., Urtiz-Estrada, N., López-Miranda, J., Kirchmayr, M. R., & Páez-Lerma, J. B. (2022). Bacterial population monitoring during alcoholic fermentation of mezcal in Durango by DGGE. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 49(2), 112–122. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v49i2.2367>
- Wang, C., Mouchère, H., Lemaitre, A., & Viard-Gaudin, C. (2017). Online flowchart understanding by combining max-margin Markov random field with grammatical analysis. *International Journal on Document Analysis and Recognition*, 20(2), 123–136. <https://doi.org/10.1007/s10032-017-0284-8>