



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA AMBIENTAL**

FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“ESTIMACIÓN DE HUELLA DE CARBONO
MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE
CICLO DE VIDA DEL SISTEMA PRODUCTIVO
AGAVE-MEZCAL”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

PRESENTA

**RODRIGO ALEJANDRO
ARRIAGA SUÁREZ**

DIRECTORA DE TESIS: DR. LILIANA
MÁRQUEZ BENAVIDES.

CODIRECTOR DE TESIS: DR. RICARDO
MUSULE LAGUNES.

Morelia, Mich. Mayo 2026.

INDICE

INDICE DE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS	5
INDICE DE GRÁFICOS	6
GLOSARIO.....	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Cambio Climático.....	12
1.1.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.....	12
1.1.2. Economía Circular	14
1.1.3. Desarrollo sustentable	15
1.2 Marco de Evaluación de Impacto Ambiental.....	16
1.2.1 Tipos y clasificación de Impactos Ambientales.....	17
1.2.2 Evaluación de Impacto Ambiental	19
1.2.2.1 Listas de verificación o revisión.	19
1.2.2.2 Diagramas o redes de interacción.....	20
1.2.2.3 Matriz de Leopold.....	21
1.2.2.4 Método gráfico o de superposición	21
1.2.2.5 Análisis de Ciclo de Vida.....	22
1.3. Evaluación de la huella de carbono	26
1.3.1. Definición de huella de carbono	26
1.3.2. Metodologías y estándares internacionales para el cálculo de HC	27
1.3.3. Alcance del Análisis de Huella de Carbono.	29
1.4. Panorama general de la producción de mezcal (Tendencias de producción y consumo de mezcal).	31
1.4.1 Contexto histórico.	31
1.4.2. Clasificación del mezcal	35
1.4.3. Producción y exportación de mezcal	37
1.4.4. Proceso de Producción de Mezcal	38
1.4.4.1. Cosecha, Corte o Jima.....	39

1.4.4.2. Cocción	40
1.4.4.3. Molienda o martajado.....	42
1.4.4.4. Fermentación	43
1.4.4.5. Destilación.....	44
1.4.5. Técnicas tradicionales versus modernas.....	45
1.5. ANTECEDENTES	47
Huella de Carbono y Sostenibilidad en la Industria de Bebidas alcohólicas .	47
1.5.1. La industria de bebidas alcohólicas en México.....	47
1.5.2. Huella de carbono y sostenibilidad en la industria de bebidas alcohólicas.....	47
1.6. CONCEPTUALIZACIÓN	50
1.6.1. Problema de Investigación	50
1.6.2. Pregunta de Investigación	50
1.6.3. Hipótesis de investigación	50
1.6.4. Objetivos.....	50
1.6.5. Justificación.....	51
1.7. Métodos.	53
1.8. Justificación de la elección de la ISO 14067 sobre la ISO 14044 para el estudio de la producción de mezcal	54
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	56
2.1. Desarrollo del Análisis de Ciclo de Vida.....	56
2.1.1. Definición de objetivos y alcance.	59
2.1.1.1. Función del sistema.....	59
2.1.1.2. Unidad funcional.....	59
2.1.1.3. Límites del sistema.....	60
2.1.2. Análisis de inventario	60
2.1.2.1. Asignación de cargas ambientales	62
2.1.3. Análisis de Impacto.....	62
2.1.4. Interpretación	63
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ESTUDIO DE CASO SISTEMAS PRODUCTIVOS AGAVE-MEZCAL.	65
3.1. FASE I. Definición de objetivo y alcance.....	66
3.1.1. Objetivo del ACV.....	66
3.1.2. Alcance	67
3.1.2.1. Unidad Funcional.....	67

3.1.2.2. Descripción del sistema y área de estudio	67
3.1.2.2.1. Límites del sistema.....	70
3.1.2.2.2. Exclusión del sistema	75
3.1.2.2.3. Cuantificación.	76
3.1.2.2.4. Criterios de corte.....	76
3.1.2.3. Tipos y fuentes de datos.....	76
3.1.2.4. Cambio de uso de suelo	77
3.1.2.5. Procedimientos de asignación	78
3.1.2.6. Horizonte temporal de los datos	78
3.1.2.7. Supuestos por etapas de ciclo de vida de producto.....	79
3.1.2.8. Limitaciones del estudio de Huella de Carbono	80
3.1.2.9. Impactos a evaluar.....	80
3.1.2.10. Método de evaluación de impactos.....	81
3.2. FASE II. Etapa de Análisis de Inventario de Ciclo de Vida	81
3.2.1. Recolección y cálculo de datos.....	81
3.2.2. Balance de Materia	95
3.3. FASE III. Evaluación de Impacto	98
3.3.1. Huella de Carbono de producto de los sistemas estudiados	98
3.3.2. Huella de Carbono de producto e impacto asociado de cada sistema productivo	99
3.3.2.1. Sistema Productivo 1 (Tumbisca, Mich.).....	100
3.3.2.1.1. Contribución a la HCP por etapa SP1.....	100
3.3.2.1.2. Contribución porcentual a la HCP por proceso SP1.	101
3.3.2.1.3. Contribución a la HCP por gas contaminante SP1.....	101
3.3.2.2. Sistema Productivo 2 (San Luis Atolotitlan, Pue.)	103
3.3.2.2.1. Contribución a la HCP por etapa SP-2.....	103
3.3.2.2.2. Contribución porcentual a la HCP por proceso SP2.	104
3.3.2.2.3. Contribución a la HCP por gas contaminante SP2.....	105
3.3.2.3. Sistema Productivo 3 (Santiago Matatlán, Tlaxolula, Oax.)	105
3.3.2.3.1. Contribución a la HCP por etapa SP-3.....	105
3.3.2.3.2. Contribución porcentual a la HCP por proceso SP-3.	106
3.3.2.3.3. Contribución a la HCP por gas contaminante SP-3	107
3.3.3. Comparativo por etapas de ciclo de vida entre SPs.....	108
3.3.3.1. Etapa de cultivo/vivero	108
3.3.3.2. Etapa de Transporte de Materias Primas.....	110

3.3.3.3. Etapa de cosecha/jima.....	111
3.3.3.4. Etapa de cocción.....	112
3.3.3.5. Etapa de molienda	112
3.3.3.6. Etapa de fermentación	113
3.3.3.7. Etapa de destilación	114
3.3.3.8. Etapa de empacado	115
3.3.3.9. Etapa de transporte a centro de distribución.....	118
3.3.3.10. Etapa de uso	119
3.4. FASE IV. INTERPRETACIÓN	120
PROPUESTA DE MITIGACIÓN Y REDUCCIÓN DE HUELLA DE CARBONO DE PRODUCTO POR SISTEMA	125
CONCLUSIONES.....	127
ANEXOS	136

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de una lista de verificación. Fuente: Salvador et al. (2005). 20	
Figura 2. Ejemplo de un diagrama de interacción. Fuente: Salvador et al. (2005).....	21
Figura 3. Fases metodológicas del análisis de ciclo de vida. Fuente: (ISO, 2006).	22
Figura 4. . Directrices de la familia ISO 14060. Fuente: ISO (2018).....	29
Figura 5. Distribución espacial de especies de agave mezcalero en México. Fuente: García Mendoza (2023).	31
Figura 6. Diagrama de las etapas del proceso de producción del mezcal. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 7. Proceso de cosecha o jima del agave.....	40
Figura 8. Proceso de cocción del agave.	42
Figura 9. Proceso de molienda de las piñas del agave con tahona chilena.	43
Figura 10. Etapa de fermentación del proceso de mezcal.	44
Figura 11. Alambiques de cobre y madera para el proceso de destilado del mezcal.....	45
Figura 12. Representación gráfica de la comparación de procesos entre categorías de mezcal. Fuente: Extraída de Arellano-Plaza et al. (2022).....	46
Figura 13. Árbol de decisiones para escoger el estándar o metodología para el desarrollo de la huella de carbono. Elaboración Propia a partir de: Pre-Sustainability (2022).	55
Figura 14. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.	58

Figura 15. Diagrama de flujo estándar de inventario de ciclo de vida (Feijoo&Moreira, 2020).....	61
Figura 16. Ubicación geográfica del SP-1 Mich.....	68
Figura 17. Ubicación geográfica del SP-2 Pue.....	69
Figura 18. Ubicación geográfica del SP-3 Oax.....	69
Figura 19. Ubicación geográfica-espacial de los palenques estudiados.	70
Figura 20. Representación de las fases del ACV contempladas en este estudio.	71
Figura 21. Límites del sistema contemplados en este estudio.	71
Figura 22. Sitio de cultivo de plántulas de agave (SP-1).....	83
Figura 23. Sitio de trasplante de ejemplares adultos.....	84
Figura 24. Selección de agaves maduros para jima (SP-1).	85
Figura 25. Jima del agave para la obtención de las piñas (SP-2).	85
Figura 26. Cabezas de agave jimadas en campo.	89
Figura 27. Transporte de cabezas de agave.....	93
Figura 28. Balance de materia SP-1 (Mich).....	95
Figura 29. Balance de materia SP-2 (Pue).....	96
Figura 30. Balance de materia SP-3 (Oax).....	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de impactos ambientales de acuerdo con sus atributos.	17
Tabla 2. . Ventajas y limitaciones de las distintas metodologías usadas para la EIA.	23
Tabla 3. Tipos de metodologías utilizadas para el cálculo de huella de carbono.	27
Tabla 4. Ventajas sobre el análisis de la huella de carbono.....	30
Tabla 5. Producción de mezcal por año (2011-2022) por entidad federativa. ...	33
Tabla 6. Clasificación y características del proceso de producción del mezcal.	35
Tabla 7. Clasificación del mezcal después de procesos de destilación y rectificación.	36
Tabla 8. Producción de mezcal en México de acuerdo con sus clasificaciones.	38
Tabla 9. Comparativas de huella de carbono de productos mediante Análisis de Ciclo de Vida.	49
Tabla 10. Sitios de estudio y especies empleadas.....	68
Tabla 11. Especies de agave identificadas en este trabajo.....	77
Tabla 12. Inventario de Ciclo de Vida de la Fase de Extracción de Materias Primas por Unidad Funcional (1 botella de mezcal artesanal joven de 750 ml.).	86
Tabla 13. Inventario de Ciclo de Vida de la etapa de Producción en palenque/vinata por la producción de 1 botella de mezcal joven de 0.750 lt....	89

Tabla 14. Inventario de Ciclo de Vida de la fase de Uso por la producción de 1 botella de mezcal joven de 0.750 lt.	91
Tabla 15. Inventario de Ciclo de Vida de la etapa de Transporte por la producción de 1 botella de mezcal joven de 0.750 lt.	94
Tabla 16. Huella Hídrica por Sistema.	123
Tabla 17. Comparativa de resultados con reportados en la literatura.	123

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Producción nacional de mezcal por año (2011-2022) por entidad federativa con DOM.	34
Gráfico 2. Producción de mezcal en México por año referido (45%alc. Vol.). Fuente: elaboración propia a partir de COMERCAM (2023).	37
Gráfico 3. Huella de carbono de producto por UF de los sistemas productivos estudiados.	98
Gráfico 4. Contribución por etapa de la huella de carbono de producto del SP-1.	100
Gráfico 5. Contribución porcentual por proceso del SP-1 a la HCP.	101
Gráfico 6. Contribución por contaminante en KgCO ₂ -eq.	102
Gráfico 7. Contribución por etapa de la huella de carbono de producto del SP-2.	103
Gráfico 8. Contribución porcentual por proceso del SP-2 a la HCP.	104
Gráfico 9. Contribución por contaminante en KgCO ₂ -eq.	105
Gráfico 10. Contribución por etapa de la huella de carbono de producto del SP-3.	106
Gráfico 11. Contribución porcentual por proceso del SP-3 a la HCP.	107
Gráfico 12. Contribución por contaminante en kgCO ₂ -eq.	108
Gráfico 13. Comparativo de etapa de cultivo de HCP entre SPs.	109
Gráfico 14. Comparativo de etapa de transporte de materias primas de HCP entre SPs.	110
Gráfico 15. Comparativo de etapa de cosecha de HCP entre SPs.	111
Gráfico 16. Comparativo de etapa de cocción de HCP entre SPs.	112
Gráfico 17. Comparativo de etapa de molienda de HCP entre SPs.	113
Gráfico 18. Comparativo de etapa de fermentación de HCP entre SPs.	114
Gráfico 19. Comparativo de etapa de destilación de HCP entre SPs.	114
Gráfico 20. Comparativo de etapa de empackado de HCP entre SPs.	115
Gráfico 21. Impacto Por Proceso En Etapa De Empacado SP-1.	116
Gráfico 22. Huella de Carbono de Producto de los SPs estudiados sin considerar manufactura de insumos de empaque.	117
Gráfico 23. Huella De Carbono De Producto Por UF De Los Sistemas Productivos asumiendo un reúso 5 Veces de la botella.	118
Gráfico 24. Comparativo de etapa de transporte a centro de dist. de HCP entre SPs.	119
Gráfico 25. Comparativo de etapa de uso de HCP entre SPs.	120

GLOSARIO

ACV: Análisis de Ciclo de Vida.

GWP: Global Warming Potential, por sus siglas en inglés. Es el potencial de calentamiento global.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

HCP: Huella de Carbono de Producto.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, por sus siglas en inglés. Es el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

ISO: International Organization for Standardization, por sus siglas en inglés. Es la Organización Internacional para la Estandarización.

SP: Referido en el documento como Sistema Productivo.

SP-1: Referido en el documento como Sistema Productivo 1 (Tumbisca, Michoacán).

SP-2: Referido en el documento como Sistema Productivo 2 (San Luis Atolotitlán, Puebla).

SP-3: Referido en el documento como Sistema Productivo 3 (Santiago Matatlán, Oaxaca).

RESUMEN

La industria de la producción del mezcal en México ha crecido sustancialmente en la última década. Como cada actividad agroindustrial, este proceso genera impactos ambientales en el agua, el suelo y la atmosfera. Antecedentes reportados en la literatura han manifestado el impacto ambiental, en términos de huella de carbono y otras categorías de impacto, por la producción de una botella de mezcal en México, sin embargo, la información aún es escasa y el contexto actual exige mayor profundización en el tema.

El objetivo de esta investigación fue cuantificar la huella de carbono de producto (HCP) asociada a la producción de una botella de mezcal artesanal joven de 750 ml en distintos escenarios productivos con un enfoque de ciclo de vida para comparar su impacto entre ellos y la literatura existente.

El cálculo de la HCP se realizó siguiendo la metodología de la norma ISO 14067. Los límites del sistema abarcaron etapas desde la adquisición de materias primas hasta el fin de vida del producto mismo y su destino final (Análisis de Ciclo de Vida de la “cuna a la tumba”). El modelado se llevó a cabo en el software *OpenLCA* (versión 2.4.1) utilizando la base de datos de *Ecoinvent 3.11* y el método de evaluación del IPCC (AR6 2021) para la categoría de Potencial de Calentamiento Global (GWP100).

Los resultados arrojaron valores de la HCP que se encuentran en el rango de 1.3 - 2.02 kg CO₂e por botella. Las etapas de ciclo de vida con mayor contribución a esta huella en los distintos escenarios productivos fueron las etapas de envasado (debido a la manufactura del vidrio) y las etapas de transporte (tanto de materia prima como la distribución del producto final) esto último a causa de las largas distancias recorridas y el tipo de vehículo empleado.

Los modelos presentados sugieren que un reúso de la botella de vidrio (5 veces) podría reducir la HCP hasta en un 27%. Se recomienda emplear herramientas y principios de la economía circular que permitan disminuir el impacto ambiental asociado sin modificar o alterar la técnica de producción artesanal del mezcal.

Palabras clave: Impacto ambiental, mezcal artesanal, “hotspots”, Gases de Efecto Invernadero, economía circular.

ABSTRACT

The mezcal industry in Mexico has experienced substantial growth over the past decade. Like any agro-industrial activity, this process generates environmental impacts on water, soil, and the atmosphere. Previous literature has documented the environmental impact—in terms of carbon footprint and other impact categories—associated with the production of a bottle of mezcal in Mexico. However, available information remains scarce, and the current context demands further in-depth research on the subject.

The objective of this research was to quantify the carbon footprint product (CFP) associated with the production of a 750 mL bottle of young (joven) artisanal mezcal across different production scenarios. A life cycle approach was employed to compare the impacts among these scenarios and against existing literature.

The PCF calculation was performed following the ISO 14067 standard methodology. The system boundaries encompassed stages from raw material acquisition to the end-of-life of the product and its final disposal (cradle-to-grave Life Cycle Assessment). Modeling was conducted in the OpenLCA software (version 2.4.1), utilizing the Ecoinvent 3.11 database and the IPCC (AR6 2021) assessment method for the Global Warming Potential (GWP100) impact category.

Results yielded PCF values ranging from 1.3 to 2.02 kg CO₂e per bottle. The life cycle stages with the greatest contribution to this footprint across the different production scenarios were packaging (due to glass manufacturing) and transportation (both for raw materials and final product distribution), the latter driven by the long distances traveled and the types of vehicles used.

The presented models suggest that reusing the glass bottle (5 times) could reduce the CFP by up to 27%. It is recommended to implement circular

economy tools and principles to mitigate the associated environmental impact without altering the artisanal mezcal production technique.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

I. INTRODUCCIÓN

La crisis ambiental actual, provocada por el cambio climático antropogénico, ha posicionado a la cuantificación y mitigación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como una prioridad obligatoria en la academia científica y en la política global (IPCC, 2021).

En este contexto, el sector agroindustrial juega un papel muy importante y complejo ya que representa una contribución considerable dentro de las emisiones de GEI liberadas a la atmosfera a nivel global, por actividades como el cambio de uso de suelo, el consumo de combustibles fósiles y la gestión de sus residuos.

México, comprometido con los objetivos del Acuerdo de París y la Agenda 2030, enfrenta el reto de separar su crecimiento económico con el impacto ambiental, especialmente en sectores de alto valor económico e industrial con la meta de alcanzar cero emisiones netas para el 2050 (SEMARNAT, 2025).

Dentro del contexto agroindustrial mexicano, la producción de mezcal ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década, consolidándose como un distintivo de identidad nacional y un motor de desarrollo económico para diversas regiones rurales avaladas bajo la Denominación de Origen Mezcal (DOM). Sin embargo, este "boom" comercial ha traído consigo cuestiones críticas sobre la sostenibilidad de sus procesos tradicionales y que tan impactantes son para el medio ambiente. A pesar de su percepción como un producto artesanal y orgánico, la

transformación del agave en mezcal es un proceso intensivo en el uso de recursos naturales, caracterizado por una alta demanda de biomasa forestal (leña) para las etapas térmicas, un consumo hídrico significativo y la generación de residuos líquidos (vinazas) y sólidos (bagazo) que, sin un manejo adecuado, representan focos de contaminación y emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso N_2O .

La carencia de estudios que demuestren datos cuantitativos precisos sobre los impactos ambientales asociados a los distintos procesos productivos del mezcal limita la capacidad que tienen los tomadores de decisiones y productores para implementar estrategias de mitigación. Es aquí donde la herramienta de Huella de Carbono de Producto y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), estandarizado por la normativa ISO 14040, 14044; y 14067 para huella de carbono de producto, se formen como las herramientas metodológicas más favorables para evaluar las cargas ambientales de un producto desde un enfoque "de la cuna a la tumba". Al considerar todas las etapas, desde la extracción de materias primas agrícolas hasta la disposición final de los residuos, el ACV permite identificar los puntos críticos o hotspots ambientales que comúnmente permanecen ocultos en análisis convencionales.

La presente investigación de tesis aborda esta problemática mediante la estimación de la Huella de Carbono de producto bajo los lineamientos de la ISO 14067 de tres Sistemas Productivos (SP) de mezcal artesanal ubicados en regiones estratégicas de la DOM: Michoacán (SP1), Puebla (SP2) y Oaxaca (SP3). La selección de estos sitios permite un análisis comparativo, contrastando variables críticas como la eficiencia de conversión de diferentes especies de agave (*A. cupreata*, *A. potatorum*, *A. angustifolia*), el desempeño energético de los hornos de cocción y destilación, y las prácticas de gestión de residuos y transporte.

A través de la generación de Inventarios de Ciclo de Vida (ICV) específicos y el modelado en software especializado para la estimación del impacto ambiental, este estudio no solo busca cuantificar las emisiones de CO_2 equivalente por unidad funcional de mezcal envasado, sino también explicar cómo las variaciones regionales y tecnológicas influyen en el perfil ambiental del

producto. Los resultados obtenidos pretenden servir como base científica para proponer estrategias de eco-diseño y optimización de procesos que permitan transitar hacia una producción de mezcal más resiliente, eficiente y compatible con las bases de la sostenibilidad ambiental.

1.1 Cambio Climático

El cambio climático, según el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), son aquellos cambios a largo plazo (décadas o siglos) en los patrones climáticos de la Tierra, estos pueden ser cambios en las temperaturas promedio, cambios en los patrones de precipitaciones, así como los niveles de mar fluctuantes, entre otros indicadores climáticos producidos por actividades humanas y otros factores naturales (IPCC, 2023).

Es importante mencionar que existe una estrecha relación entre el cambio climático y el calentamiento global, sin embargo, tienen diferencias específicas. El calentamiento global se refiere al aumento de la temperatura global promedio de la Tierra debido al acrecentamiento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, principalmente causados por las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación. Por otro lado, el cambio climático abarca un concepto más amplio ya que considera las consecuencias adversas del calentamiento global, y en un contexto que parte de los cambios climatológicos del planeta que pueden ser desde decenas a cientos y miles de años (Climate Change: Vital Signs of the Planet, 2022).

1.1.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

El calentamiento global es cada vez más un fenómeno preocupante que atenta contra la vida del ser humano y la de otras especies que viven en el planeta Tierra. El principal responsable de este fenómeno son los gases de efecto invernadero (GEI) producidos principalmente y en su mayoría por el ser humano y sus actividades.

El fenómeno del efecto invernadero existe y ocurre de manera natural en el planeta Tierra y gracias a ello es posible que el ser humano y millones de especies puedan vivir.

Este evento tiene suma relevancia con las emisiones; la particularidad que tienen los gases debido al comportamiento de sus moléculas es que pueden absorber energía, esta energía se convierte en movimiento molecular interno y por ende aumenta la temperatura. Diferentes gases en la atmósfera tienen capacidades de absorción selectivas para diferentes longitudes de onda, lo que afecta el calentamiento y el equilibrio energético del planeta (Ballesteros&Aristizabal, 2007).

Un ejemplo es el ozono, el cual es un gas que es fundamental para absorber la radiación ultravioleta del sol, mientras que el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases traza absorben la radiación infrarroja emitida por la Tierra. Esta absorción infrarroja calienta la atmósfera y emite radiación de onda más larga, de la cual una parte se irradia al espacio y otra regresa a la superficie terrestre, contribuyendo al efecto invernadero natural y controlando el flujo de energía del sistema climático. Este efecto es esencial para mantener la temperatura de la Tierra adecuada para la vida, ya que, sin él, la temperatura promedio global sería de -18°C (Ballesteros&Aristizabal, 2007).

Los gases responsables de la absorción de radiación infrarroja se conocen como gases de efecto invernadero (GEI), y entre ellos se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua, el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4), los hidrofluorocarbonados (HFCs), perfluorocarburos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF_6). Estos gases tienen moléculas cuyas frecuencias vibratorias se encuentran en la parte infrarroja del espectro electromagnético (Trespalcios et al., 2018).

El problema comienza cuando en la parte inferior de la atmósfera (troposfera) se van acumulando una gran cantidad de GEI mucho mayores a la cantidad necesaria para mantener un equilibrio sistémico y una estabilidad climática. El efecto de estos gases acumulados representa un aumento de energía traducido en el incremento de la temperatura global del planeta, misma que a su vez trae consigo fenómenos adversos que atentan contra la vida y

subsistencia de muchas especies que viven en el planeta entre ellos el ser humano (Ballesteros&Aristizabal, 2007).

La actividad humana es la principal responsable del aumento de GEI, especialmente se atribuye a la quema de combustibles fósiles como el carbón, petróleo o gas y secundariamente a la deforestación de bosques que fungen como reservorios de carbono (IPCC, 2023).

Los efectos del aumento de la temperatura global media del planeta van desde el derretimiento de los glaciares y casquetes polares los cuales alteran el aumento del nivel del mar, hasta la alteración de los patrones de precipitación y el aumento de la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como tormentas, sequías e inundaciones (IPCC, 2023).

1.1.2. Economía Circular

De acuerdo con *Ellen MacArthur Foundation* (2015), quienes destacan el concepto de economía circular como aquel modelo de producción y consumo que implica compartir, arrendar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes durante el mayor tiempo posible. Dicho modelo se basa en tres principios: 1. eliminar los residuos y la contaminación; 2. circular productos y materiales; 3. regenerar los sistemas naturales.

A comparación del modelo tradicional de producción y consumo este enfoque difiere del ciclo de extraer, fabricar y tirar; y presenta importantes ventajas en lo que atañe a la sostenibilidad. Para los consumidores, da lugar a productos que duran más o son más fáciles de reparar, actualizar, volver a fabricar, reutilizar o reciclar. Para las empresas, ofrece varias ventajas potenciales, como una mayor eficiencia en el uso de los recursos tanto materiales como económicos y una menor exposición a la volatilidad de los precios.

La economía circular abarca el ciclo de vida completo de un producto. Sin embargo, ésta comienza desde el principio mismo de la vida de un producto. Tanto la fase de diseño como los procesos de producción tienen un impacto sobre la obtención, la utilización de los recursos y la generación de residuos a lo largo de la vida de un producto (*Informe Especial Economía Circular*

Transición Lenta de Los Estados Miembros a Pesar de La Acción de La UE ES, 2023).

Con el fin de reducir al mínimo su impacto medioambiental, los productos y los procesos de producción deben rediseñarse con arreglo a los principios de la economía circular.

En torno al 80% del impacto medioambiental de un producto viene determinado por su diseño (European Commission, 2012).

1.1.3. Desarrollo sustentable

El concepto de desarrollo sustentable es un término que ha venido evolucionando a través de los años gracias a acontecimientos importantes, críticos y sustanciales en nuestro planeta al día de hoy. Desde su aparición como concepto y modelo de desarrollo en la Comisión de Bruntland (1972) se introdujo y se presentó al mundo como el modelo que había que seguir para seguir logrando un próspero desarrollo humano sin exceder los límites de los recursos naturales y que éstos pudieran preservar para las generaciones futuras.

Con el paso del tiempo comenzaron a aparecer nuevos términos y variantes relacionadas al concepto de desarrollo sustentable y/o sustentabilidad adoptadas por organizaciones, gobiernos, academia, autores, entre otros; los cuales proponían modelos a seguir en diferentes esferas sociales en pro del uso de los recursos naturales, las relaciones humanas y el ambiente (Suárez & Vázquez, 2017).

Sobre estas nuevas definiciones y adaptaciones del concepto de Desarrollo Sustentable podemos encontrar términos en común relacionados a nuestros hábitos de consumo y nuestra manera de vivir, por ejemplo, sustentabilidad urbana, energética, agrícola, educativa, tecnológica, turística, sustentabilidad del agua, forestal y de transporte. Sin embargo, en todas estas definiciones podemos encontrar palabras en común que encabezan y definen lo que es en realidad el desarrollo sustentable: bienestar, preservar, gestión, futuro, equidad, responsabilidad, entre otras.

Con ello podemos adecuar una definición propia la cual acuño a continuación:

“El desarrollo sustentable o sustentabilidad es un modelo y una guía de prácticas para lograr una prosperidad y bienestar social y ambiental que nos permita satisfacer nuestras principales necesidades, siempre y cuando seamos responsables, con pensamiento crítico para poder preservar los recursos naturales que extraemos para poder realizar nuestras actividades humanas, sin alterar los procesos ecosistémicos. Si bien es construir una gestión eco-social para garantizar la existencia de la vida humana y todas las formas de vida de las cuales dependemos como especie siendo igualitarios y respetuosos”.

Actualmente el concepto de desarrollo sustentable, integra y valoriza 3 esferas más a las ya conocidas y presentadas en un principio, ahora considera no solamente el ámbito social, económico y ambiental, sino que también integra el área política, espiritual y cultural, las cuales representan una parte sustancial de la sociedad.

1.2 Marco de Evaluación de Impacto Ambiental

El impacto ambiental se define como aquellas alteraciones ya sean positivas o negativas en el entorno producidas por una obra o proyecto antropogénico en un espacio o tiempo determinados (Perevochtchikova, 2013, p. 287).

Otro significado y objetivo del impacto ambiental lo define la SEMARNAT como aquel “instrumento de la política ambiental, cuyo objetivo es prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente, así como la regulación de obras o actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el entorno” (SEMARNAT, 2018).

Dicho lo anterior realizar un estudio de impacto ambiental es de suma importancia para conocer de manera integral la magnitud de los impactos ambientales, los cuales van a servir para “identificar, predecir, interpretar, prevenir valorar y comunicar el impacto que la realización de un proyecto acarreará sobre el entorno, además de proponer acciones y medidas que mitiguen el daño y/o permitan optimizar los procesos (Conesa, 1997).

1.2.1 Tipos y clasificación de Impactos Ambientales

Existen diferentes maneras de clasificar a los impactos ambientales, ya sea por su origen, por su temporalidad, por sus atributos, por su valoración, entre algunas otras. A continuación, se detalla la clasificación de los impactos ambientales por su origen de acuerdo con la SEMARNAT (2018):

- Aprovechamiento de recursos naturales: renovables (aprovechamiento forestal, pesca) y no renovables (extracción de combustibles fósiles).
- Contaminación: Cualquier actividad que produzca algún residuo, así sean gases o líquidos peligrosos que se puedan desprender a la atmosfera o hacia un cuerpo de agua.
- Ocupación del territorio: Actividades que por su construcción o proceso ocupan una porción del territorio y modifican sus condiciones naturales (desmonte, compactación de suelo).

Otra clasificación de los Impactos Ambientales más robusta y que integra varios aspectos es de acuerdo con sus atributos. La tabla 1, extraída de Espinoza (2021), representa dicha clasificación.

Tabla 1. Clasificación de impactos ambientales de acuerdo con sus atributos.

Criterio	Tipo	Descripción
Certidumbre	Probable	Cuando la posibilidad de ocurrencia es alta.
	Improbable	Cuando la posibilidad de ocurrencia es baja.
	Desconocido	Cuando no se sabe si puede o no ocurrir.
Efectos	Directos	Acciones que generan efectos de manera inmediata o a largo plazo sin mediación de ningún otro impacto.
	Indirectos	Efectos resultantes del impacto directo y que pueden manifestarse tardíamente.
	Acumulativos	Se suman a través del tiempo y pueden conjuntarse con otros impactos.
	No acumulativos	No se asocian con otros impactos.
	Puntual	Se presenta en el lugar donde ocurre la acción del proyecto.

Localización	Local Regional	Abarca el sitio del proyecto y zonas aledañas. Trasciende a la localidad donde ocurre la acción y se proyecta en una región adicional.
Importancia	Irrelevantes Importantes	Hay un efecto, pero, dados los intereses de la localidad, no es digno de tomarse en cuenta. El efecto es de interés para conciliar los deseos de la población, aunque sea de magnitud menor.
Magnitud	Significativo Moderado No significativo	Si los impactos tienen efecto importante sobre el ambiente. Si los efectos son medianamente importantes. Si los impactos al ambiente no son importantes.
Mitigación	Remediabiles No remediable	Se les puede aplicar una medida de control o de atenuación. No existen medidas de control o de atenuación.
Permanencia	Transitorio Residual	Cuando se puede modificar con una medida de mitigación. Aquél que prevalece después de aplicar todas las medidas posibles de mitigación.
Presencia	Momentáneo Temporal Permanente	Se presenta de manera inmediata cuando se ejecuta una acción del proyecto y desaparece con ella. Queda en el ambiente por un tiempo y aun después de concluir la acción. Permanece en el ambiente después de concluir la acción del proyecto.
Reversibilidad	Reversibles No reversible	Las condiciones que existían antes de efectuar la actividad que causó el impacto se restablecen una vez que dicha actividad se suspende. Las condiciones iniciales del proyecto no se restablecen, aunque la actividad que ocasionó el impacto sea suspendida o eliminada.
Cualidad	Negativa Positiva	Si los impactos perjudican al ambiente se denominan adversos. Si el proyecto trae beneficios al ambiente se denomina benéfico.
Temporalidad	Corto plazo Mediano plazo Largo plazo	Aparecen inmediatamente o en lapsos relativamente cortos una vez que se realizan las actividades del proyecto. Se manifiestan después de uno o varios años. Aparecen mucho después de iniciado el proyecto.

Tipo	Cuantificables Cualitativos	Se expresan en escalas de proporcionalidad. Se expresan con criterios objetivos de valoración.
------	--------------------------------	---

Fuente: Espinoza (2021).

1.2.2 Evaluación de Impacto Ambiental

Teniendo en cuenta lo anterior, la evaluación de Impacto Ambiental es considerada como una metodología o proceso mediante el cual se pueden identificar y valorizar los efectos que un proyecto producirá, por esto mismo la evaluación no puede considerarse objetiva, ya que al momento de integrar la calidad ambiental en la evaluación ésta se sale de la objetividad y se vuelve un concepto subjetivo a la opinión de varias personas al decidir si dicho efecto es bueno o malo (Salvador et al., 2005).

Es importante tener en cuenta que para poder decidir si un proyecto u obra es o no aceptable desde el punto de vista ambiental se deben valorar correctamente los impactos sobre el medio ambiente de forma que puedan ser tomados en cuenta dentro del proceso de toma de decisiones (Salvador et al., 2005).

Existen diferentes metodologías útiles para la identificación de los impactos ambientales, cada una tiene sus ventajas y desventajas dependiendo del tipo de proyecto al que estará sujeta. A continuación, se describen algunas.

1.2.2.1 Listas de verificación o revisión.

Consisten en generar un listado de los impactos ambientales posibles generados por la actividad humana, los cuales pueden cubrir rubros de atmósfera, suelo, agua, flora, fauna y recursos naturales, sociales o culturales (Mijangos-Ricárdez&López Luna, 2013).

A través de esta lista se pueden deducir y analizar los impactos significativos, es decir, si los efectos son mínimos o notables.

En la figura 1 se presenta un ejemplo de una lista de verificación.

	Carácter		Duración		En el tiempo		Espacio		Reversible	Irreversible	Recuperable	Irrecuperable	Juicio
	Beneficio	Negativo	Tempora	Permanente	Corto plazo	Largo plazo	Local	Extenso					
Calidad del aire		X		X	X		X		X		X		Compatible
Contaminación de las aguas		X		X	X		X		X		X		Severo
Erosión		X		X		X		X		X		X	Moderado
Pérdida de cultivos		X		X	X			X		X	X		Severo
Pérdida de vegetación		X		X	X			X	X	X			Severo
Pérdida de hábitats		X		X	X		X			X		X	Crítico
Riesgo de incendios		X	X			X	X		X		X		No significado
Empleo y renta	X		X		X		X		X		X		Positivo
Nivel de ruidos		X		X	X		X			X	X		Compatible

Figura 1. Ejemplo de una lista de verificación. Fuente: Salvador et al. (2005).

1.2.2.2 Diagramas o redes de interacción

Estos diagramas permiten realizar una red de impactos, pero considerando relaciones de causa-efecto, lo que busca resaltar son las acciones y sus influencias directas o indirectas sobre los elementos ambientales. Así pues, se puede relacionar una acción inicial con varios de los efectos que ésta puede producir (Figura 2) (Salvador et al., 2005).

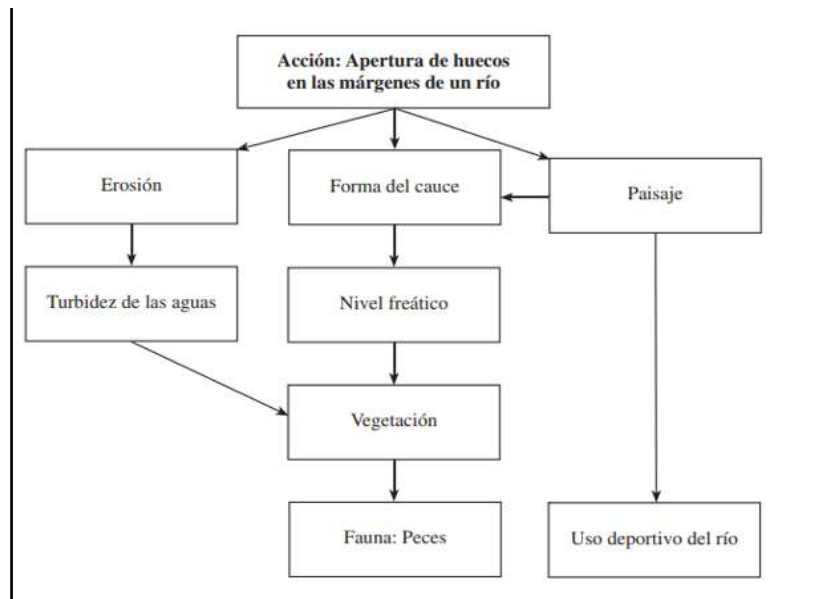


Figura 2. Ejemplo de un diagrama de interacción. Fuente: Salvador et al. (2005).

1.2.2.3 Matriz de Leopold

Existen diversas metodologías de matrices para evaluar los impactos ambientales, sin embargo, la más utilizada en los proyectos es la matriz de Leopold. Dicha matriz se caracteriza por presentar las acciones del proyecto (en columnas) conteniendo un listado de 100 acciones y los componentes y características del medio (en filas) conteniendo un total de 88, lo que significa un total de 8800 posibles interacciones (Mijangos-Ricárdez&López Luna, 2013).

La ventaja de utilizar esta metodología es que permite la estimación subjetiva de los impactos mediante la utilización de una escala numérica, así como la comparación de alternativas y la determinación de interacciones.

1.2.2.4 Método gráfico o de superposición

Este método consiste en la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) donde por medio de mapas se hace un levantamiento de los componentes ambientales del sitio del proyecto (hidrología, suelos, geología, topografía, asentamientos humanos), los cuales, pueden superponerse para

lograr la identificación de los posibles impactos ambientales. Suele ser útil cuando no es posible aplicar alguna matriz (Arboleda, 2005).

1.2.2.5 Análisis de Ciclo de Vida.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es también una metodología muy útil para cuantificar los impactos ambientales de los procesos derivados de cadenas productivas o servicios.

Este análisis se basa en la identificación de impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio, que va desde la adquisición de las materias primas, el proceso de producción, integra también el uso del producto por parte del cliente, el tratamiento final y así como su posible reciclado o su disposición final (ISO, 2006).

La norma que rige y en la que se basa esta metodología es la ISO 14040:2006, la cual tiene como objetivo principal determinar aquellos impactos potenciales de gran magnitud o que representan un mayor foco de atención (*hotspots*), relacionados con un producto o servicio, para ello se requiere primeramente de la realización de un inventario donde se recopilan todas las entradas y salidas, para posteriormente hacer la evaluación de dichos impactos y, finalmente se realiza la fase de interpretación de resultados de acuerdo con los impactos y objetivos estudiados (Fig. 3) (ISO 2006).

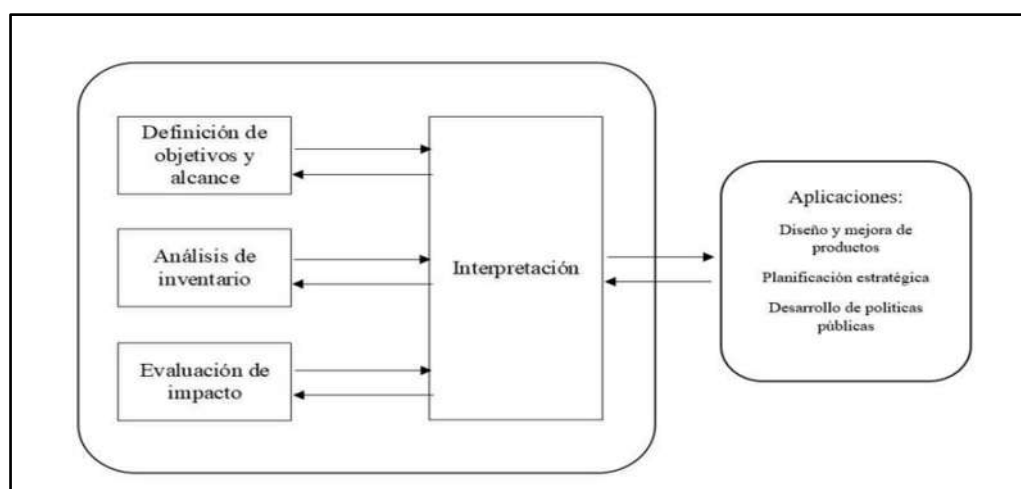


Figura 3. Fases metodológicas del análisis de ciclo de vida. Fuente: (ISO, 2006).

De acuerdo con Finnveden et al. (2009) y Curran (2014) algunas de las ventajas que este análisis tiene son las siguientes:

- Produce un análisis completo ya que es posible incluir todas las etapas del ciclo de vida.
- Identifica áreas de oportunidad ya que considera la interacción de actividades y etapas a través de un pensamiento holístico.
- Considera una amplia gama de impactos ambientales, incluyendo la comparación entre ellos aun cuando sean de distinta naturaleza.
- Permite la proyección de escenarios futuros o hipotéticos para estudiar diferentes condiciones de operación.

Si bien el uso del ACV ha cobrado gran importancia a través de los últimos años y su utilidad se ha ido replicando cada vez más, tiene ciertas limitantes que pueden dificultar el proceso metodológico tales como el acceso a todos los datos para la generación de inventario, por lo que es necesario complementar con datos similares reportados, simulaciones o interpolaciones.

Tabla 2. . Ventajas y limitaciones de las distintas metodologías usadas para la EIA.

METODOLOGÍA	VENTAJAS	LIMITACIONES
<i>Listas de revisión/chequeo</i>	• Útil para identificar los efectos mínimos y los impactos significativos. • Permite cubrir casi todas las áreas de impacto. • Estructura las etapas iniciales de una EIA • Útil para comparar diversas	• Suele ser de carácter unidimensional, lineal y limitado para evaluar los impactos individuales. • No permite identificar impactos indirectos o riesgos posibles asociados a los impactos. • No ofrecen indicaciones sobre la localización

	alternativas del proyecto.	espacial del impacto
<i>Diagramas o redes de interacción</i>	• Permite identificar relaciones causales asociadas a los impactos. • Permite identificar impactos indirectos.	• Se dificulta la cuantificación de impactos. • Se limitan a mostrar las relaciones causa-efecto. • Si la red es extensa, genera confusión y dificultad en el manejo de la información.
<i>Matriz de Leopold</i>	• Permite la estimación subjetiva de los impactos. • Útil para comparar distintas alternativas. • Identifica las acciones del proyecto que causan impactos de menor o mayor magnitud e importancia. • Puede ajustarse a las particularidades	• No existen criterios únicos de valoración. • Resultados altamente subjetivos. • Sujetos a criterios de un grupo multidisciplinario evaluador.

de cada proyecto.

- Facilidad para identificar efectos por amplitud de factores.

<i>Método Gráfico o superposición</i>	• Útil cuando existen variaciones espaciales de los impactos (que no son posibles con matrices). • Permiten identificar una característica física, social o cultural que resulta de un impacto ambiental específico. • Útiles en las reuniones con el público y en actividades para la difusión o aclaración de conceptos.	• Los resultados son limitados por el número de impactos que pueden ser analizados en una misma operación.
---------------------------------------	--	--

<i>Análisis de Ciclo de Vida</i>	• Evaluación integral de un producto o servicio.	• Depende de datos precisos y modelos de evaluación.
	• Permite a las empresas tomar decisiones informadas.	• El alcance del ACV puede variar significativamente según los objetivos y límites del estudio, lo que dificulta la comparación de diferentes ACVs.
	• Identifica puntos críticos de los impactos	
	• Permite cumplir con reglamentos y normativas ambientales.	• Suele no considerar aspectos económicos o sociales.

Fuente: Elaboración propia a partir de Salvador et al., 2005; Mijangos-Ricárdez&López Luna, 2013; Pelaez&Correa, 2004.

1.3. Evaluación de la huella de carbono

1.3.1. Definición de huella de carbono

La huella de carbono según la definición de *Intedya* (s.f) es “Un indicador de sostenibilidad que mide la incidencia de una actividad, producto, evento u organismo sobre el cambio climático a lo largo de su ciclo de vida. Es un método útil para cuantificar, reducir y neutralizar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y contribuir a mitigar el Cambio Climático”.

Algunos otros autores definen este parámetro como la estimación de los gases de efecto invernadero producidos por actividades antropogénicas principalmente aquellas que tienen que ver con la quema y uso de combustibles fósiles para la generación de energía y calefacción y así

satisfacer las necesidades o actividades humanas. (Schneider & Samaniego, 2010).

La magnitud del impacto suele reportarse en kg o toneladas de dióxido de carbono equivalente de GEI.

1.3.2. Metodologías y estándares internacionales para el cálculo de HC

Diversas organizaciones están desarrollando modelos para medir y reportar los impactos de los gases de efecto invernadero en productos y servicios debido al creciente interés en la competitividad, las emisiones y la huella de carbono. Estos modelos, tienen como objetivo establecer estándares nacionales y mejorar la calidad de la información ambiental proporcionada a clientes y autoridades. Países como Alemania, Estados Unidos, Francia, Japón y el Reino Unido están avanzando en la implementación de metodologías para calcular la huella de carbono y la incorporan en el etiquetado de productos, lo que ayuda en la toma de decisiones y promueve la colaboración entre empresas y proveedores para reducir las emisiones (Schneider&Samaniego, 2010).

Tabla 3. Tipos de metodologías utilizadas para el cálculo de huella de carbono.

MÉTODOLOGÍAS EXISTENTES	Guías Generales Normas ISO que representan estándares de referencia para el cálculo de CO ₂ (ISO 14040, ISO 14064:2018-1 Análisis de Ciclo de Vida, ISO 14067:2012 y Gestión Ambiental)
	Guías Específicas PAS 2050, Bilan Carbone o el GHG Protocol para la contabilidad, cálculo y el monitoreo de GEI.
	Herramientas de cálculo Herramientas para actividades específicas como el transporte o el comportamiento del consumidor, calculadas por lo general en páginas web.

Fuente: Elaboración propia a partir de Schneider&Samaniego (2010).

Es importante mencionar que para realizar cualquier medición de cálculo de huella de carbono y GEI es indispensable tomar como base las normas internacionales sobre las cuales se sustenta el trabajo, dichas normas pertenecen a la ISO y específicamente a la familia de las ISO 14060; este grupo de normas tiene como objetivo proporcionar la claridad y coherencia para que se puedan realizar las mediciones de huella de carbono así como dar seguimiento, validar e informar de dichas emisiones a la población objetivo.

Dentro de esta familia se distinguen 2 normas que caracterizan y dirigen el objeto de estudio. La norma ISO 14064:2018-1 se basa principalmente en los requisitos y principios para el diseño, desarrollo, gestión e informe de los inventarios de GEI a nivel de la **organización o empresa**. Esto incluye la determinación de los límites de emisión y remoción de GEI, así como las actividades o acciones dirigidas a la empresa para la mejora en la gestión de sus emisiones (ISO, 2018).

Además, esta norma posee un nuevo enfoque de medición, que amplía el estudio de cuna a tumba para los bienes utilizados por la organización o empresa, por lo que se sigue un enfoque de análisis de ACV por producto o proceso realizado, debido a que estas emisiones resultan de las actividades de terceros asociadas con los insumos utilizados por la organización (Cano et al., 2022).

Mientras que la norma ISO 14067:2018 se basa en proponer los requisitos y principios para cuantificar las emisiones de huella de carbono de un **producto o servicio**. Su objetivo es medir las emisiones de GEI de un producto asociadas a todas sus etapas de ciclo de vida comenzando con la extracción/abastecimiento de materia prima y ampliándose a través de las etapas de producción, uso y finalización de la vida del producto (desecho o reciclaje). Es por ello por lo que esta norma se sustenta de otras normas ISO internacionales, específicamente de las ISO 14040 e ISO 14044 las cuales establecen los lineamientos para la evaluación del análisis de ciclo de vida de algún producto o servicio (ISO, 2018).

En la figura 4 se ilustra la relación y objetivo de cada norma de la familia ISO 14060.

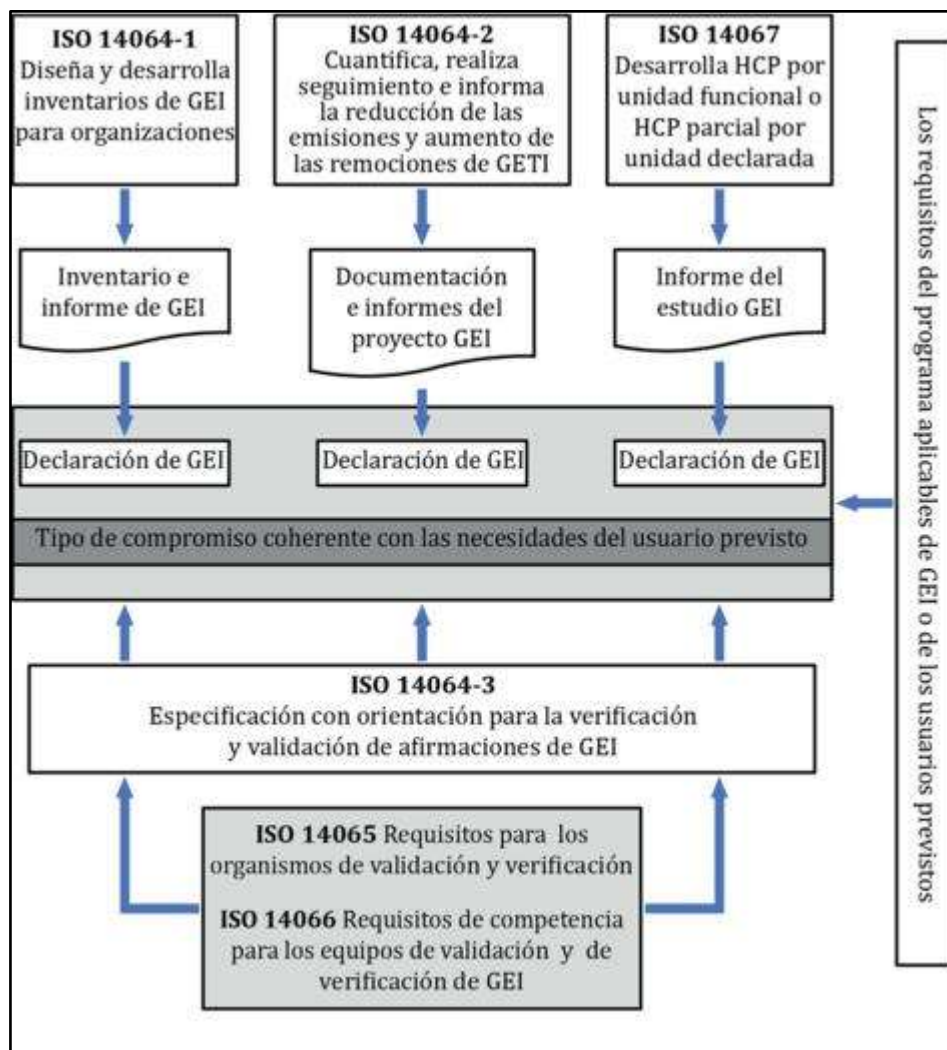


Figura 4. . Directrices de la familia ISO 14060. Fuente: ISO (2018).

1.3.3. Alcance del Análisis de Huella de Carbono.

El cálculo de huella de carbono suele ser muy útil para las empresas y consumidores pues trae consigo diversas ventajas descritas en ISO (2018-A) y por Cano et al. (2022), a su vez este análisis también representa desafíos y limitantes considerables para realizar un estudio de este tipo. Dichas ventajas y desafíos se representan en la tabla 4.

Tabla 4. Ventajas sobre el análisis de la huella de carbono.

Ventajas (Beneficios)	Limitaciones (Desafíos)
Permite identificar los hotspots (puntos de interés) para las actividades que emiten altas emisiones de GEI.	El cálculo de la HCP es complejo, requiere un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) completo (lo que demanda tiempo, recursos especializados y acceso a datos de toda la cadena de suministro).
Proporciona una medición precisa de las emisiones de GEI derivadas de las actividades en el proceso de producción.	La precisión depende de la calidad de los datos de actividad y de los factores de emisión. Los factores de emisión genéricos o desactualizados pueden generar resultados con una alta incertidumbre.
Ayuda a aumentar la conciencia pública por las emisiones de GEI y su impacto en la atmósfera.	A pesar de las normas ISO (como ISO 14067 para HCP), existen múltiples metodologías de cálculo y diferentes maneras de establecer los límites del sistema, lo que dificulta la comparación directa entre productos de distintas empresas o países.
Facilita la toma de decisiones basadas en datos con el objetivo de minimizar el impacto ambiental generado por la producción y actividades de la organización.	Riesgo de Greenwashing (Lavado Verde): Una comunicación incompleta o el énfasis excesivo en la HCP sin abordar otros impactos ambientales puede llevar a que los consumidores perciban un engaño, dañando la reputación.
Permite identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias para reducir las emisiones y avanzar hacia la eficiencia energética y llegar a la carbono-neutralidad.	El análisis se centra únicamente en el impacto del Cambio Climático (emisiones GEI). No evalúa otros impactos ambientales críticos como el consumo de agua (Huella Hídrica), la toxicidad, la acidificación del suelo o la pérdida de biodiversidad.
Ayuda a las empresas o gobiernos a cumplir con las regulaciones legales relacionados con la reducción de emisiones	La inversión inicial en software, formación de personal o consultoría externa para realizar el ACV y calcular la HCP puede ser una barrera significativa para las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMEs).

1.4. Panorama general de la producción de mezcal (Tendencias de producción y consumo de mezcal).

1.4.1 Contexto histórico.

El mezcal es una bebida alcohólica tradicional mexicana, su nombre proviene del nahuatl *metl* que significa “agave” y de *ixcalli* que significa “cocido o cocinado” (Bowen, 2015). Esta bebida proviene del maguey (*Agave* spp.) El cual es una planta característica de México, en especial de las regiones semiáridas y surge como parte de la mezcla entre la tradición prehispánica por el uso del maguey y por la introducción de técnicas de destilación por parte de los españoles (Barraza-Soto, 2014).

En México se cuenta con alrededor de 150 especies de agave de las más de 200 que existen, de las cuales aproximadamente de 12 a 15 especies se utilizan para la elaboración del mezcal (Esqueda et al., 2011; Financiera Rural, 2011). En la figura 5 se muestra la distribución espacial de 11 taxa del género *Agave* (*Agavaceae*) más importantes como productores de mezcal en México.



*Figura 5. Distribución espacial de especies de agave mezcalero en México.
Fuente: García Mendoza (2023).*

La NOM-070-SCFI-2016-bebidas alcohólicas-mezcal-especificaciones (DOF, 2016), define al mezcal como una “bebida alcohólica destilada mexicana, 100 % de maguey o agave, obtenida por destilación de jugos fermentados con microorganismos espontáneos o cultivados, extraídos de cabezas maduras de magueyes o agaves cocidos”.

Esta misma norma mexicana se encarga de regular la producción del mezcal en México, la cual tiene la intención de establecer las especificaciones para su proceso de producción, etiquetado, control de calidad, registro de productores entre otras. El organismo encargado de promover y vigilar el cumplimiento de esta norma es el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM), entre sus operaciones más importantes está el revisar el cumplimiento de los requisitos de calidad, el cual requiere de garantizar el origen del producto, cuidar su calidad química, proteger al mezcal de su posible adulteración y garantizar las características del tipo de mezcal y de la marca, con lo que se certifica la calidad del producto (Chávez-Parga et al., 2016).

México cuenta con la denominación de origen del mezcal, la cual protege la propiedad intelectual de 39 municipios de Durango, 1 de Guanajuato, 81 de Guerrero, 570 de Oaxaca, 58 de San Luis Potosí, 11 de Tamaulipas y 58 de Zacatecas y 29 del estado de Michoacán (Chávez-Parga et al., 2016).

La producción de mezcal en México por entidad se detalla en la siguiente tabla (Tabla 5) y gráfico (gráfico 1). El estado que más contribuye a la producción total es Oaxaca con el 91.31%, seguido de Puebla (3.44%) y Durango (1.41%). Michoacán ocupa el 6to lugar de producción por año con un 0.91% de la producción total.

Tabla 5. Producción de mezcal por año (2011-2022) por entidad federativa.

Estado	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Oaxaca	77.40%	93%	99.40%	93.70%	93.70%	83.50%	87%	92.30%	90.10%	92.70%	85.40%	91.31%
Puebla	-	-	-	-	-	0.10%	3.50%	1.50%	3.20%	2.20%	2.50%	3.44%
Durango	0.00%	0.60%	0.00%	0.40%	0.50%	1.60%	1.80%	2.00%	2.50%	1.70%	2.70%	1.41%
Guerrero	0.30%	1.60%	0.40%	0.90%	1.10%	3.50%	2.50%	1.80%	1.10%	1.00%	0.90%	0.94%
San Luis Potosí	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%	0.70%	1.30%	0.70%	0.60%	0.90%	0.90%	0.94%
Michoacán	-	0.00%	0.00%	0.50%	0.20%	0.80%	0.60%	1.50%	0.30%	0.60%	1.30%	0.91%
Zacatecas	22.20%	4.50%	0.10%	4.40%	0.50%	9.30%	2.80%	0.10%	1.70%	0.70%	5.70%	0.86%
Tamaulipas	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.00%	0.20%	0.05%	0.30%	0.13%
Guanajuato	0.00%	0.20%	0.10%	0.00%	0.20%	0.50%	0.40%	0.10%	0.30%	0.10%	0.20%	0.06%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

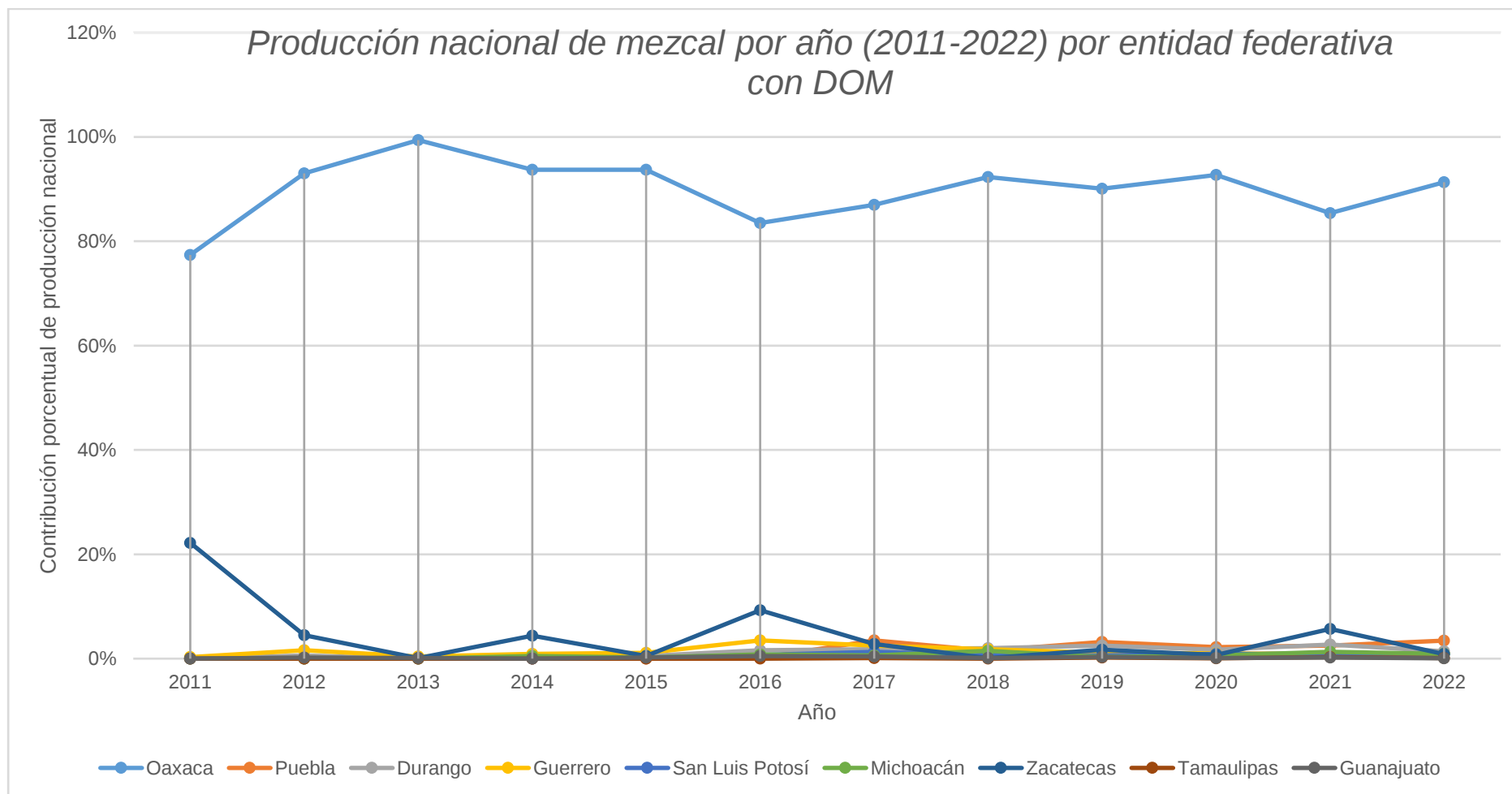


Gráfico 1. Producción nacional de mezcal por año (2011-2022) por entidad federativa con DOM.

1.4.2. Clasificación del mezcal

De acuerdo con el proceso específico utilizado ya sea de cocción, molienda, fermentación y/o destilación del maguey o agave, la NOM-070-SCFI-2016 (DOF, 2016) clasifica al mezcal en las siguientes categorías (Tabla 6):

Tabla 6. Clasificación y características del proceso de producción del mezcal.

CLASIFICACIÓN DEL MEZCAL DE ACUERDO CON SU PROCESO DE PRODUCCIÓN				
ETAPA TIPO DE MEZCAL	COCCIÓN	MOLIENDA	FERMENTACIÓN	DESTILACIÓN
Mezcal	En hornos de pozo, mampostería o autoclave.	En una tahona, molino chileno o egipcio, trapiche, desgarradora, tren de molinos o difusor.	En recipientes de madera, piletas de mampostería o tanques de acero inoxidable.	En alambiques, destiladores continuos o columnas de cobre o acero inoxidable.
Mezcal Artesanal	En hornos de pozo o elevados de mampostería.	Con mazo, tahona, molino chileno o egipcio, trapiche o desgarradora.	Oquedades en piedra, suelo o tronco, piletas de mampostería, recipientes de madera o barro, pieles de animal, cuyo proceso puede incluir la fibra del agave (bagazo).	Con fuego directo en alambiques de caldera de cobre u olla de barro y montera de barro, madera, cobre o acero inoxidable; cuyo proceso puede incluir la fibra del agave (bagazo).
Mezcal Ancestral	Cocimiento de cabezas de maguey o agave en hornos de pozo.	Con mazo, tahona, molino chileno o egipcio.	Oquedades en piedra, suelo o tronco, piletas de mampostería, recipientes de madera o barro, pieles de animal, cuyo proceso puede incluir la fibra del agave.	Con fuego directo en olla de barro y montera de barro o madera; cuyo proceso puede incluir la fibra del agave.

Fuente: Elaboración propia a partir de DOF, 2016.

Posteriormente la norma hace una clasificación de acuerdo con las características adquiridas en procesos posteriores a la destilación y rectificación (Tabla 7).

Tabla 7. Clasificación del mezcal después de procesos de destilación y rectificación.

CLASES DEL MEZCAL Y CARACTERÍSTICAS	
Mezcal Blanco o Joven	Mezcal incoloro y translúcido que no está sujeto a ningún tipo de proceso posterior.
Mezcal madurado en vidrio	Mezcal estabilizado en recipiente de vidrio más de 12 meses, bajo tierra o en un espacio con variaciones mínimas de luminosidad, temperatura y humedad.
Mezcal Reposado	Mezcal que debe permanecer entre 2 y 12 meses en recipientes de madera que garanticen su inocuidad, sin restricción de tamaño, forma, y capacidad en L, en un espacio con variaciones mínimas de luminosidad, temperatura y humedad.
Mezcal Añejo	Mezcal que debe permanecer más de 12 meses en recipientes de madera que garanticen su inocuidad de capacidades menores a 1000 L, en un espacio con variaciones mínimas de luminosidad, temperatura y humedad.
Mezcal Abocado con	Mezcal al que se debe incorporar directamente ingredientes para adicionar sabores, tales como gusano de maguey, damiana, limón, miel, naranja, mango, entre otros, siempre que estén autorizados por el Acuerdo correspondiente de la Secretaría de Salud, así como en la NOM-142-SSA1/SCFI-2014
Mezcal destilado con	Mezcal que debe destilarse con ingredientes para incorporar sabores, tales como pechuga de pavo o pollo, conejo, mole, ciruelas, entre otros, en términos de la presente Norma Oficial Mexicana.

Fuente: Elaboración propia a partir de DOF (2016).

1.4.3. Producción y exportación de mezcal

La producción de mezcal en México se ha incrementado sustancialmente en los últimos años debido a que ha tenido más popularidad dentro del consumo de bebidas alcohólicas tanto en nuestro país como en muchos otros países del mundo actualmente, esto a partir del fenómeno de la globalización.

Según datos de la COMERCAM (Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal), al 2022 en México, se tuvo un registro de producción por año de 14,165,505 litros de mezcal (45%alc. Vol.) casi el doble al registrado solo en 2019 (7,145,039 l) y casi 14 veces más que el registro que se tuvo en el 2012 con 1,044,696 litros de mezcal. Esto hace reflejar de manera clara una tendencia exponencial del consumo y producción de mezcal en la población (gráfico 2).

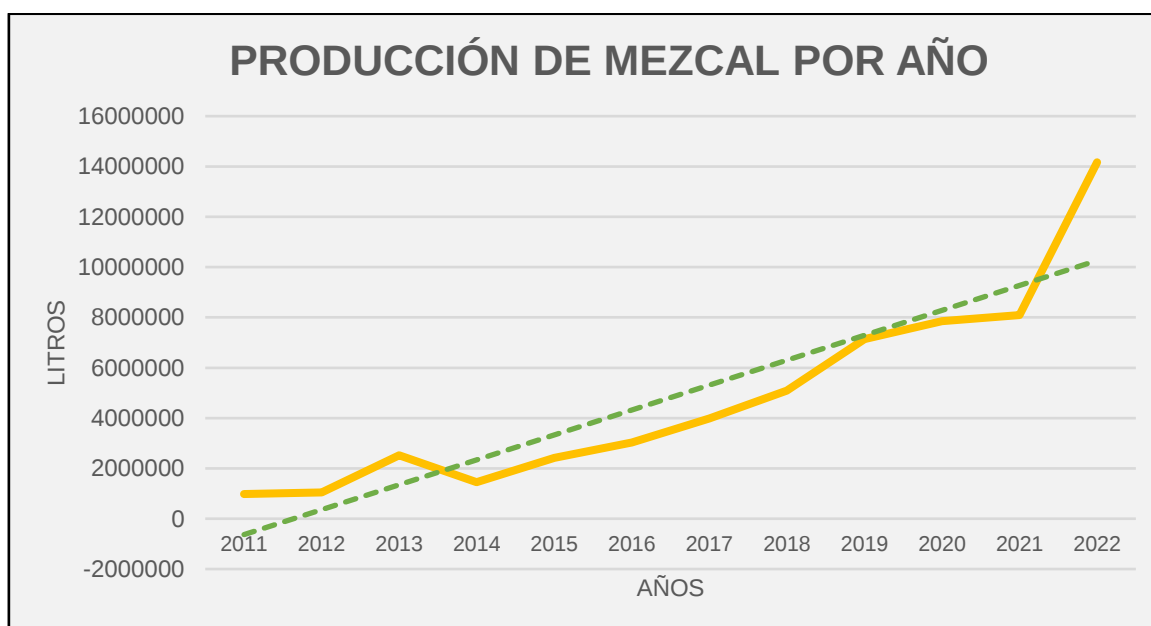


Gráfico 2. Producción de mezcal en México por año referido (45%alc. Vol.). Fuente: elaboración propia a partir de COMERCAM (2023).

En la tabla 8 se muestran los porcentajes de producción de mezcal de acuerdo con sus clasificaciones. El mezcal artesanal es el tipo de mezcal por categoría

que más se produce actualmente casi en su totalidad (95.35%), mientras que el mezcal blanco o joven es el que ocupa el mayor porcentaje de producción (98.78%) a comparación con el mezcal destilado; por otro lado, el maguey más utilizado para su producción es el conocido como Maguey Espadín del género (*A. angustifolia*).

Tabla 8. Producción de mezcal en México de acuerdo con sus clasificaciones.

PRODUCCIÓN DE MEZCAL (45% Alc. Vol.)		
POR CATEGORÍA	Mezcal Ancestral	0.44%
	Mezcal	4.22%
	Mezcal Artesanal	95.35%
POR CLASE	Blanco o Joven	98.78%
	Destilado con	1.22%
POR TIPO DE MAGUEY	Maguey Espadín (<i>A. angustifolia</i>)	88.06%
	Maguey Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	1.50%
	Maguey Cuishe (<i>A. Karwinskii</i>)	1.43%
	Maguey verde (<i>A. Salmiana</i>)	1.27%
	Maguey Cenizo (<i>A. durangensis</i>)	1.17%
	Otros	6.57%

Fuente: Elaboración propia a partir de: COMERCAM (2023).

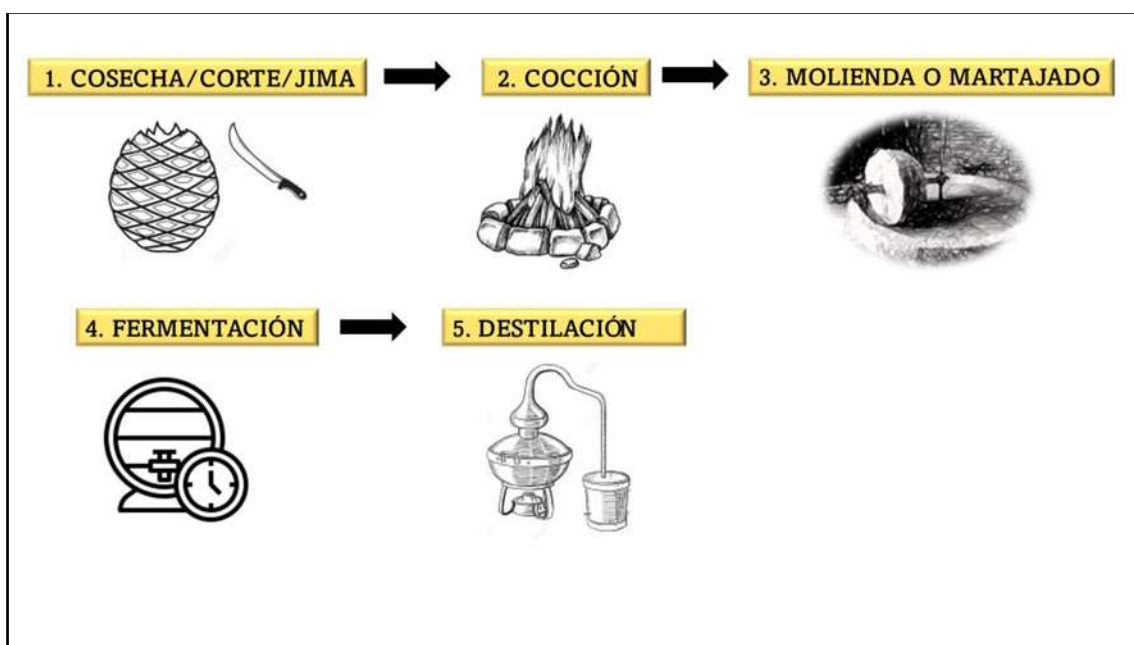
En lo que refiere al ámbito de exportación el mezcal ha tenido un aumento significativo en la producción para exportar, datos del COMERCAM reportan una tasa de crecimiento en el envasado (para exportación) de 2022 de 67.43% con respecto al 2021. Para que nos demos una idea más general, tan solo en el 2012 se reportaron 768,014 litros de producción de mezcal para exportación mientras que para el 2022 se registraron 8,543,324 litros, un aumento muy importante y considerable en tan solo 10 años (COMERCAM, 2023).

1.4.4. Proceso de Producción de Mezcal

Debido a la gran variedad de especies de agave utilizadas para la producción del mezcal, así como diversas prácticas, condiciones de producción y equipos

utilizados, hacen que el proceso de la producción del mezcal no sea único y repetible, se vuelve más versátil a comparación del proceso de producción del tequila que conlleva prácticas más ajustadas y determinadas (Arellano-Plaza et al., 2022).

Sin embargo, la creación del mezcal se distingue por tener 5 fases que todos los productores aplican, independientemente de la técnica tradicional o moderna que puedan llegar a emplear (Figura 6).



*Figura 6. Diagrama de las etapas del proceso de producción del mezcal.
Fuente: Elaboración propia.*

1.4.4.1. Cosecha, Corte o Jima

El proceso inicia con la selección del agave, el cual constituye la materia prima para el proceso de producción del mezcal, del cual solo se aprovecha la “piña” o “cabeza” que conforma el cuerpo del agave sin hojas. Para la selección del agave, se requiere que éste entre en su madurez, principalmente identificada por la edad de la planta, algunos productores estiman que pueden estar en el rango de los 6 a 10 años (Christine et al., s.f.).

Un rasgo que ayuda a indicar la madurez del agave es el surgimiento del escapo floral o “quioté” mismo que surge de la parte central de la planta, y que llega a tener una altura considerable, esto permite identificar que el agave ha

entrado en su ciclo de floración y que morirá al término de ésta (Christine et al., s.f.).

En algunos lugares, principalmente en aquellos que utilizan técnicas ancestrales y donde se cuenta con Denominación de Origen, deciden dejar el agave seleccionado en el campo de 6 a 12 meses antes de cosecharlo con el fin de que la “piña” acumule la mayor cantidad de azúcares posibles (Christine et al., s.f.).

Para la cosecha del agave se cortan las hojas dejando la “piña” libre para su extracción, este proceso debe realizarse in situ (“Jima in situ”), posteriormente las “piñas” son llevadas a la vinata para su procesamiento (Christine et al., s.f.; Barraza-Soto, 2014).



Figura 7. Proceso de cosecha o jima del agave.

1.4.4.2. Cocción

En esta fase se realiza la cocción de las “piñas”, generalmente se utilizan hornos circulares hechos en el piso contruidos con tierra y/o mampostería y algunos llegan a emplear ladrillos o piedra volcánica para recubrir las paredes y evitar pérdidas de calor (Christine et al., s.f.; Barraza-Soto, 2014); algunos otros productores utilizan autoclaves como herramienta para realizar la cocción de las piñas. En el fondo del horno se suelen colocar piedras, que son calentadas con leña, enseguida se ponen las cabezas o piñas, las cuales son tapadas con hojas de palma y con tierra (Fig.8).

Aunque la temperatura y el tiempo de cocción son los principales factores que definen la eficiencia de la hidrólisis de fructanos (polímeros de fructosa), esta fase de cocción suele durar de 6 a 7 días, hasta que se obtiene un color clásico, el olor indicativo y un sabor dulce de las piñas, algunos otros factores pueden ser determinantes debido a la forma en que se realiza la cocción. (Barraza-Soto, 2014; Arellano-Plaza et al., 2022).

En esta fase se pretende llegar a 3 grandes objetivos los cuales son determinantes para la calidad del producto:

- Ablandar el agave para facilitar la molienda.
- Generar azúcares asimilables por las levaduras en la fermentación. Ya que las piñas de agave son muy ricas en azúcares, estos forman largas cadenas en las plantas y las levaduras son incapaces de asimilar los azúcares en esta forma. Durante el cocimiento, gracias al calor generado estos azúcares se cortan (hidrolizan) para formar azúcares simples (principalmente fructosa) que consume la levadura empleada durante la fermentación para reproducirse y producir alcohol (principalmente etanol).
- Generar algunos compuestos volátiles los cuales son importantes en las características aromáticas del producto final. Algunos de estos compuestos le confieren sus notas características “ahumadas” al mezcal. Sin el cocimiento estas notas no estarían presentes y el producto obtenido sería muy diferente.

(Christine et al., s.f.).



Figura 8. Proceso de cocción del agave.

1.4.4.3. Molienda o martajado

Una vez cocidas las piñas pasan a la fase de molienda, la cual tiene como finalidad hacer que los azúcares hidrolizados dentro de las piñas ya cocidas estén disponibles para los microorganismos durante la fase de fermentación; es decir, reducir el tamaño de los trozos grandes del agave cocido, a la menor fracción posible (Cedeño,1995; Christine et al., s.f.).

La molienda se realiza de diferentes formas, las más tradicionales son: macerado a mano, machacado en una tahona o molino chileno (molino que funciona por la fuerza de caballos o mulas) (figura 9), o en una desgarradora apoyándose además con una prensa (Arellano-plaza et al., 2022; Financiera Rural 2011).

Al terminar la molienda se obtiene el jugo llamado mosto y el bagazo (residuo del agave cocido y molido); el mosto es depositado o bombeado a las tinajas de fermentación (Financiera Rural, 2011).



Figura 9. Proceso de molienda de las piñas del agave con tahona chilena.

1.4.4.4. Fermentación

La fermentación se suele realizar ya sea en tinas de madera o cuero, pilas forradas de madera o en tanques de acero inoxidable. En estos recipientes se colocan las cabezas de maguey cocido y macerado, se le agrega agua y se pone a fermentar durante 5 días aproximadamente, aprovechando las levaduras que naturalmente se encuentran en la mezcla y aquellas que quedaron del proceso anterior, es importante mencionar que no se adicionan cepas o levaduras cultivada, únicamente los generados naturalmente. La efectividad del fermentado depende tanto de la levadura como de la calidad del agua utilizada (Barraza-Soto, 2014).

Mediante este proceso, que tiene una duración de 1 a 9 días dependiendo del proceso de fermentación, se logra la conversión de los azúcares contenidos en el mosto en alcohol. Al jugo fermentado se le conoce como mosto muerto y tiene una graduación alcohólica entre 6 y 7% (Financiera Rural, 2011).

En esta fase, actúan una serie de organismos vivos (levaduras), los cuales se encargan de transformar una parte de los azúcares en alcohol (principalmente etanol) que determinan en gran parte las características organolépticas del producto final como por ejemplo los alcoholes superiores y los ésteres (Christine et al., s.f.).

En el caso particular del mezcal, el agave cocido y molido se emplea para la elaboración del mosto y se fermenta junto con el bagazo (la fibra proveniente de agave), añadiendo agua al proceso. Algunos productores, recomiendan realizar una batida o mezclado después de cuatro días de la fermentación en reposo para homogeneizar la mezcla y dejar otros días más para concluir la fermentación (figura 10) (Christine et al., s.f.).



Figura 10. Etapa de fermentación del proceso de mezcal.

1.4.4.5. Destilación

Una vez finalizada la etapa de fermentación, todo ese líquido generado se traspasa a alambiques que generalmente son de cobre, acero inoxidable o una combinación de madera y cobre (fig. 11). En estos depósitos, el líquido se hierve y evapora, para después enfriarse y condensarse lentamente a través de un serpentín, el cual dirige el líquido hacia un recipiente en donde se deposita el mezcal. El proceso de destilación se realiza en dos ocasiones (horneadas). En cada horneada se utiliza en su mayoría leña y la cocción deberá ser lenta. En este proceso la cantidad de leña y el tiempo de cocción son de suma importancia para determinar la calidad y sabor del mezcal (Arellano-Plaza et al., 2022). De la segunda destilación o refinación se obtienen tres variantes de mezcal: 1) Mezcal de punta, este es un líquido que contiene entre 70° y 85° de alcohol, 2) Mezcal de cuerpo, el contenido de alcohol de este líquido intermedio es de 50° y 75°, y 3) Mezcal de colas, que es el líquido que resulta al final de la

destilación, el cual contiene menos del 50 % de alcohol y es el que le da sabor al mezcal (Barraza-Soto, 2014).

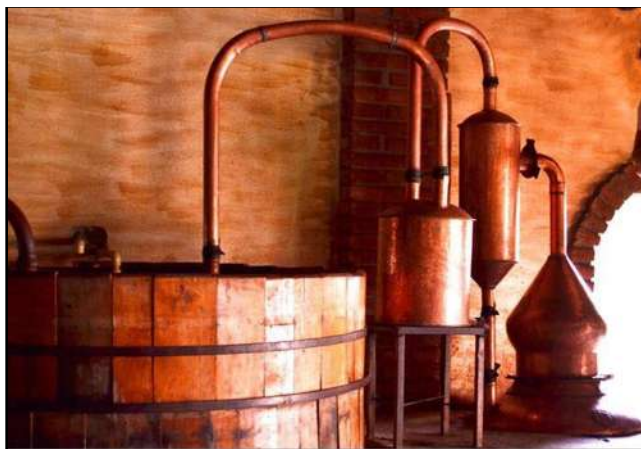


Figura 11. Alambiques de cobre y madera para el proceso de destilado del mezcal.

1.4.5. Técnicas tradicionales versus modernas

Gracias a la diversidad de especies de agave que se encuentran en México y que son utilizadas para la fabricación del mezcal, así como la amplia distribución de regiones para la producción de esta bebida, hace que existan diversas técnicas empleadas para la elaboración de este elixir. Cabe resaltar que las fases de elaboración no cambian, únicamente los equipos, materiales y/o técnicas que llegan a emplear en cada fase del proceso, algunos de manera ancestral, otros de manera tradicional, mientras que otros emplean mejores tecnologías en el proceso. En la figura 12 se muestran diversas técnicas utilizadas para su elaboración en distintas regiones de México, así como diferentes materiales o equipos utilizados en dichas fases.

El contexto socio-ecológico del mezcal, es decir la forma en la que las personas interactúan con diferentes especies de agave, modifican el entorno natural y aprovechan estas plantas para satisfacer ciertas necesidades, se ha ido transformando a través de las generaciones de productores, hoy en día, esta bebida ancestral se ha convertido en tendencia de moda lo que ha ocasionado en ciertas zonas un desplazamiento de especies para incentivar el monocultivo del agave destinado a la producción de mezcal.

Mezcal categories	Mezcal	Artesanal Mezcal	Ancestral Mezcal
Cooking	 Autoclave ovens (Zacatecas)	 Masonry ovens (San Luis Potosi)	 Pit ovens (Guerrero)
Milling	 Grinder (Guerrero)	 Chilean mill (Oaxaca)	 Mallet (Oaxaca)
Fermentation	 Stainless still tanks (Oaxaca)	 Wooden vats (Oaxaca, Guerrero)	 Wooden boxes buried in the ground (Durango, Michoacán)
Distillation	 Copper still for second distillation (Oaxaca)	 Copper and wooden pot still with direct fire (Guerrero, Michoacán, Durango)	 Clay pots still with direct fire (Oaxaca, Michoacán, San Luis Potosi)

Figura 12. Representación gráfica de la comparación de procesos entre categorías de mezcal. Fuente: Extraída de Arellano-Plaza et al. (2022).

1.5. ANTECEDENTES

Huella de Carbono y Sostenibilidad en la Industria de Bebidas alcohólicas

1.5.1. La industria de bebidas alcohólicas en México

La industria de las bebidas alcohólicas en nuestro país tiene gran relevancia dentro del ámbito económico y social. El producto que más se produce, se consume y exporta en México es la cerveza (INEGI 2017).

La Industria del Tequila y el Mezcal constituye la segunda actividad económica manufacturera más importante dentro del conjunto de las bebidas alcohólicas en México, ya que representa 18.6% de la producción bruta total. Es decir que por cada 100 pesos de bebidas alcohólicas que se producen, casi 20 pesos corresponden al tequila y mezcal. Como referencia, cabe señalar que de toda la Industria del Tequila y el Mezcal, el tequila representa alrededor del 87% de la producción y el mezcal el 13% (INEGI 2019).

El destino principal de la producción del tequila y el mezcal son para consumo mexicano y para exportación con el 49 y 51% respectivamente, es decir que prácticamente la mitad de la producción se destina para consumo nacional (INEGI 2019).

Dentro del consumo de bebidas alcohólicas destiladas en México, el tequila y el mezcal son las bebidas que más se venden y consumen seguidas de los whiskies (Seale&Associates 2021).

1.5.2. Huella de carbono y sostenibilidad en la industria de bebidas alcohólicas

Como se ha mencionado anteriormente el cálculo de huella de carbono es una herramienta de suma utilidad para las organizaciones pues ayuda a reducir costos económicos y logísticos, estar a la par de las normativas ambientales, así como poder compartir públicamente beneficios con estudios comparativos a través de productos similares.

Diversos estudios y empresas han recurrido a esta herramienta de cálculo de huella de carbono de sus productos dentro de la industria de las bebidas alcohólicas y espirituosas, un ejemplo es el estudio realizado por Colman y Pääster (2009) en el cual compararon la huella de carbono de distintos vinos procedentes de Australia, Francia y Estados Unidos (Napa) hacia el mercado de Chicago (E.U.). En este estudio encontraron que el transporte es la fase que más impactos ambientales (GEI) tiene sobre todas las demás etapas, y para el caso específico del vino de la ciudad de Napa (California) el cual obtuvo el mayor impacto asociado (4.5 kg de CO₂eq/botella de 750 ml) y en el mismo país de mercado; esto se debió a que el transporte se realizó por medio de avión, en comparación con los otros vinos extranjeros, los cuales su medio de transporte fue mediante barco principalmente, y después mediante ferrocarriles o camiones a la ciudad de destino.

Otro estudio reciente que se realizó derivado del impacto ambiental por la producción de mezcal en Michoacán, México, fue el realizado por Ruiz-Camou et al, (2023) donde evaluaron dos diferentes técnicas de producción de mezcal (artesanal y ancestral) y mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) obtuvieron datos significativos donde por una botella de 750 ml de mezcal se requiere de un aporte de energía de 114.7 y 142.2 MJ respectivamente por técnica de producción. En términos de emisiones e impacto, por cada botella producida se estima que se producen 2.1 kg de CO₂eq y las etapas que más impacto generan en términos de emisiones son las de cosecha y empaquetado de producto, esto derivado de la producción de vidrio para el envasado y de los insumos y transporte requeridos para la fase de cosecha.

Un estudio similar realizado por Martínez et al (2020), se enfocó en realizar también un Análisis de Ciclo de Vida del mezcal artesanal producido en Michoacán, donde obtuvieron un impacto de 1.7 Kg de CO₂eq por unidad funcional (Botella de 750 ml) y un consumo de energía total por producto de 163.8 MJ. La etapa que identificaron con un mayor impacto fue la de elaboración y procesamiento del mezcal, que incluye las fases de cocción, molienda, fermentación y destilación.

Se puede realizar una comparación en este mismo ámbito del mezcal con el tequila, dos bebidas de suma importancia y que presentan similitudes en su

proceso de producción, y ambos utilizan especies del género agave para la fabricación de estos productos.

El centro Mario Molina y el Consejo Regulador del Tequila (2016) en su informe sobre las estrategias sustentables para la cadena de producción del tequila, reportaron que por cada botella de 1 litro de Tequila se producen 3 Kg de CO₂eq, resultado de un ACV, y haciendo la conversión para poder hacer una comparación con los resultados antes descritos del mezcal, significa que por cada botella de tequila de 750 ml se producen 2.25 Kg de CO₂eq, el cual tiene mucha similitud con el impacto generado por la misma unidad funcional de una botella de mezcal.

Tabla 9. Comparativa de emisiones de CO₂eq de productos mediante Análisis de Ciclo de Vida

Producto	Huella de Carbono (CO ₂ eq)	Realizado por
Vino Tinto (Napa, California, EUA.)	4.5 kg de CO ₂ eq/botella de 750 ml	Colman y Păster (2009)
Mezcal (Michoacán, México)	2.1 Kg de CO ₂ eq/botella de 750 ml	Ruiz-Camou et al, (2023)
Mezcal (Michoacán, México)	1.7 Kg de CO ₂ eq/botella de 750 ml	Martínez et al (2020)
Tequila (México)	2.25 Kg de CO ₂ eq/botella de 750 ml	Centro Mario Molina y Consejo Regulador del Tequila (2016)

1.6. CONCEPTUALIZACIÓN

1.6.1. Problema de Investigación

No se conoce con exactitud como la huella de carbono de producto de la elaboración del mezcal a partir de la técnica artesanal, y utilizando un enfoque de ciclo de vida se ve modificada cuando se aplica en distintas regiones del país, considerando que se pueden emplear distintas especies de agave.

1.6.2. Pregunta de Investigación

¿Cómo se ve modificada la huella de carbono de producto de la elaboración de mezcal a partir de la técnica artesanal cuando se realiza en distintas regiones del país, considerando que se pueden utilizar diferentes especies de agave?

1.6.3. Hipótesis de investigación

La aplicación de la metodología de la norma ISO 14067 en diferentes palenques de mezcal artesanal revelará cambios particulares en la huella de carbono de cada sistema productivo, a pesar de que apliquen la misma técnica de producción artesanal influirán aspectos técnicos que modifiquen la huella de carbono.

1.6.4. Objetivos

Objetivo General

Este proyecto de investigación tiene como objetivo cuantificar y comparar la huella de carbono de producto del sistema productivo agave-mezcal de palenques de diferentes regiones del país (Michoacán, Oaxaca y Puebla) bajo la técnica de producción artesanal, con un enfoque de ciclo de vida.

Objetivos Específicos

- Identificar y comparar las fases/etapas que representan los mayores impactos ambientales entre sistemas productivos.
- Identificar y comparar los principales procesos y gases de efecto invernadero que representan los mayores impactos ambientales entre sistemas productivos.
- Proponer estrategias de mitigación y reducción de huella de carbono de los sistemas productivos de mezcal respectivamente.

1.6.5. Justificación

En un escenario de crisis climática, la evaluación de impactos ambientales en sectores agroindustriales es fundamental para tratar de explorar áreas de oportunidad en cualquier etapa de la producción del bien o servicio.

El mezcal, bebida emblemática de México con creciente demanda internacional, representa un sector económico vital, pero su producción podría generar externalidades negativas poco estudiadas. Este proyecto aborda esta brecha mediante la aplicación de la norma internacional ISO14067 para la cuantificación de la huella de carbono de producto con un enfoque de ciclo de vida, metodología integral que evalúa impactos que van desde la obtención de materias primas, el cultivo del agave, el transporte de la materia prima al sitio de producción, las etapas de producción misma, el transporte a centro de distribución/venta, el uso y hasta la disposición final de los residuos.

Este estudio es de suma importancia debido a que la información existente en relación a la huella de carbono de mezcal es exigua, y se requiere conocer de qué manera está impactando la industria mezcalera de México en el medio ambiente, este proyecto pretende sumar y aportar información sobre huella de carbono de diversos sitios mezcaleros, y así ampliar el contexto de la situación

ambiental del mezcal en México, lo que daría lugar a la generación de información aún sin reportar en la literatura acerca del impacto ambiental de distintas especies de agave empleadas y profundizar en el impacto de sistemas de producción artesanal, los cuales han sido poco estudiados. A su vez, este trabajo aborda una metodología distinta a los antecedentes presentados los cuales evalúan huellas de carbono del mezcal mediante la Norma Internacional ISO 14044, mientras que en el presente estudio se emplea la Norma Internacional ISO 14067, lo que proporcionará información relevante de huella de carbono con una metodología distinta y exclusiva para evaluación de productos.

Importancia Teórica:

1. Avance metodológico: Aunque el ACV se ha aplicado a bebidas como el tequila y el mezcal, se difiere en técnicas artesanales, escalas de producción y contextos socio ecológicos (ejemplo: hornos de tierra, uso de diferentes especies de agave). Este estudio adaptará la huella de carbono a distintos sistemas productivos de mezcal, utilizando herramientas de la ecología industrial para modelar procesos que involucren reciclaje de residuos y reducir el impacto por emisiones y residuos.
2. Cierre de brechas de conocimiento: Existen aún vacíos en la literatura sobre cómo se modifica la huella de carbono de producto cuando se realiza en diferentes regiones del país desde una perspectiva integral como la metodología de la ISO 14067. Los resultados generados proporcionarán datos primarios útiles para futuras investigaciones en sostenibilidad de bebidas espirituosas.

Impacto práctico:

1. Optimización de procesos: Identificar las etapas de alto impacto permitirá recomendar prácticas sostenibles, como transición a energías limpias o aprovechamiento de subproductos.

Relevancia Social:

1. Preservación cultural: Al proponer mejoras ambientales sin alterar las técnicas, el estudio contribuye a la viabilidad a largo plazo de tradiciones mezcaleras, vinculadas a la identidad de comunidades indígenas y rurales.
2. Educación ambiental: Sensibilizar a productores y consumidores sobre el vínculo entre el mezcal y cambio climático, fomentando consumo responsable.

En conclusión, este proyecto de investigación no sólo genera conocimiento científico innovador, sino que también ofrece herramientas para transformar la industria mezcalera en un modelo de sostenibilidad.

1.7. Métodos.

Se emplea la metodología propuesta por la ISO 14067, la cual ofrece los requisitos y los lineamientos para realizar el cálculo de huella de carbono de un “producto” basada en los principios del enfoque de análisis de ciclo de vida de acuerdo con las ISO 14040-14044 (ISO, 2006; ISO, 2018-A).

Dado que el presente trabajo es un proyecto de investigación para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental y sigue sus propias normas de redacción, exposición y comunicación al público, no se tendrán en cuenta las especificaciones de la Norma ISO 14067 sobre la comunicación de la huella de carbono al público.

Para la estimación de la huella de carbono de cada sistema productivo de mezcal evaluado, se utilizará el software especializado de uso libre “OpenLCA” (versión 2.4.1). La categoría de impacto a evaluar será la de Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential, GWP100) misma que dictamina la metodología de la ISO 14067. GWP100 se refiere a un factor de caracterización relacionado a la cantidad de calor que puede absorber un gas de efecto invernadero en comparación con el dióxido de carbono (CO₂) durante un tiempo específico (100 años en este caso) (ISO 2018, B). Se determinó específicamente la categoría de impacto GWP100 porque es la más utilizada a

nivel mundial por una cuestión de estandarización internacional y 100 años representa un punto medio y adecuado para la cuantificación de los GEI y su persistencia en la atmosfera.

Así mismo se utilizará la base de datos de *ecoinvent 3.11* y la metodología de impacto a emplear será la del *IPCC (AR6 2021)*.

1.8. Justificación de la elección de la ISO 14067 sobre la ISO 14044 para el estudio de la producción de mezcal

La decisión de emplear la Norma ISO 14067 para evaluar la producción de mezcal se fundamenta en su enfoque específico y directo hacia la cuantificación de la huella de carbono de productos (HCP). Si bien la ISO 14044 proporciona un marco general para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y diversas categorías de impacto, la ISO 14067 se centra exclusivamente en la cuantificación de la Huella de Carbono de Producto y en una sola categoría de impacto (GWP100).

Además, esta elección se refuerza al considerar el estado actual de la investigación científica. Según la información disponible, existen publicaciones científicas arbitradas que abordan la huella ambiental del mezcal desde un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (Maciel et al., 2020; Ruiz-Camou et al., 2023). Sin embargo, se identifica una clara escasez de publicaciones arbitradas que se centren específicamente en la huella de carbono del producto mezcal. Esta brecha en el conocimiento subraya la necesidad y relevancia de este estudio, que busca contribuir significativamente a la literatura científica al proporcionar una evaluación detallada de la huella de carbono del mezcal.

La ISO 14067 se alinea con el objetivo principal de este trabajo: cuantificar las emisiones de GEI asociadas al ciclo de vida del mezcal. Una vez definida la categoría de impacto para trabajar (HCP o Huella de carbono de producto) se identificó también que la ISO 14067 es una norma más general que se puede adaptar tanto a la investigación académica/científica como a organizaciones, mientras que otras como la PAS 2050 y el GHG Protocol son más detalladas y específicas utilizadas por lo general para proyectos de organizaciones o naciones. Para un estudio inicial y enfocado en la huella de carbono de

producto, la ISO 14067 proporciona una base sólida y reconocida internacionalmente. Además, la ISO 14067 puede servir como base para un estudio de ACV más amplio que cumpla con los requisitos de las normas ISO 14040 e ISO 14044.

El siguiente diagrama (fig. 13) se usó para tomar la decisión del uso de la ISO 14067, las líneas punteadas color azul indican el camino que se siguió para tomar la decisión de emplear esta metodología.

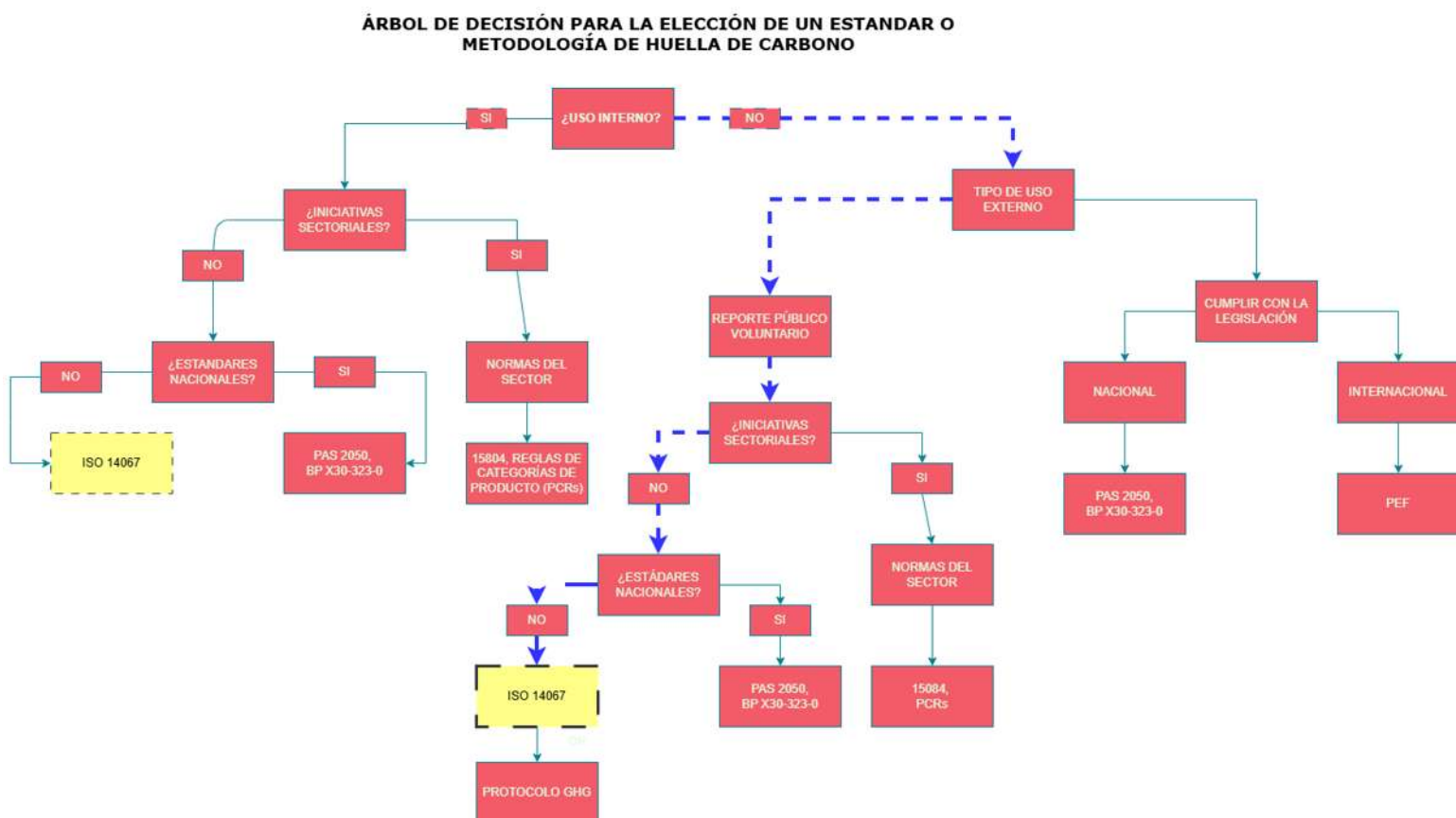


Figura 13. Árbol de decisiones para escoger el estándar o metodología para el desarrollo de la huella de carbono. Elaboración Propia a partir de: Pre-Sustainability (2022).

El mezcal, como producto agrícola con un proceso de producción que incluye etapas como el cultivo del agave, la fermentación y la destilación, tiene emisiones de GEI asociadas a cada una de estas fases. La ISO 14067 nos permite cuantificar estas emisiones de manera precisa a lo largo del ciclo de

vida del mezcal, desde la extracción de la materia prima hasta el final de la vida del producto. Esto es especialmente relevante para el mezcal, donde el uso del suelo y el carbono biogénico juegan un papel importante.

Además, la ISO 14067, al ser una norma más reciente (publicada en 2018), incorpora las actualizaciones y mejoras en la metodología de cuantificación de GEI, incluyendo un tratamiento más detallado del carbono biogénico y la electricidad, aspectos clave en la producción de mezcal.

En resumen, la ISO 14067 ofrece una precisión y aplicabilidad para evaluar el impacto ambiental clave de la producción de mezcal: enfocándose en las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto no descarta la importancia de un ACV más amplio, pero para los objetivos específicos de este estudio, la ISO 14067 proporciona las herramientas más adecuadas y actualizadas.

CAPÍTULO 2.

FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

2.1. Desarrollo del Análisis de Ciclo de Vida

El análisis del ciclo de vida tuvo su origen en la década de 1970, durante la crisis energética, surgiendo como una metodología enfocada en el análisis de flujos de materia y energía asociados a los procesos de generación y consumo de recursos. En sus etapas iniciales, su aplicación se restringió a evaluaciones básicas orientadas a detectar potenciales mejoras en la eficiencia energética dentro de los sistemas productivos y los patrones de utilización de los recursos. (Feijoo & Moreira, 2020).

El enfoque se dirige principalmente a los procesos industriales, los cuales no solo generan residuos, sino que también extraen recursos naturales, requieren de sistemas de transporte, utilizan insumos químicos, sintéticos, energía y generan productos que deben ser transportados, consumidos o utilizados para finalmente ser desechados (Universitat Politècnica de Catalunya. s.f.).

La Norma ISO 14040 define al Análisis de Ciclo de Vida como “Una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto con relación a los objetivos del estudio”.

El ciclo de vida de un producto comienza desde el diseño y desarrollo mismo del producto y finaliza con las actividades de reutilización, reciclaje, disposición final, etc. A través de las etapas de:

- Adquisición de materias primas.
- Proceso y fabricación.
- Distribución y transporte.
- Uso, reutilización y mantenimiento.
- Reciclaje.
- Gestión de los residuos.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) no solo posibilita la evaluación cuantitativa de impactos ambientales mediante una metodología objetiva y sistematizada, sino que también constituye una herramienta estratégica para la optimización

de productos en fases de diseño, producción y desarrollo. Su aplicación contribuye a la identificación de puntos críticos en la cadena de valor, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia para la reducción de impactos negativos al medio ambiente (Fullana&Puig, 1997).

De acuerdo con su metodología el ACV consta de cuatro fases iterativas (fig. 14) las cuales se describen a continuación.



Figura 14. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.

2.1.1. Definición de objetivos y alcance.

En esta primera etapa se deben definir con claridad los objetivos del estudio. Aquí se debe incluir una definición y descripción detallada del sistema o sistemas a estudiar y sus límites, así como las necesidades de búsqueda de datos, las razones del estudio y lo que se espera obtener como resultados. Se deben considerar aspectos como el alcance geográfico y temporal, y las estimaciones de la variabilidad de los datos que se pueden aceptar para la correcta realización del estudio (Feijoo et al., 2007).

2.1.1.1. Función del sistema

Aquí se deben definir las funciones del sistema y el alcance del análisis. Incluir una definición apropiada del sistema o sistemas a estudiar y sus límites, del mismo modo detallar los requisitos de búsqueda de datos, las hipótesis iniciales y el nivel de detalle que se debe abordar. Además, deben considerarse aspectos como el alcance geográfico y temporal.

Dentro del alcance también se han de definir las categorías de impacto y la metodología con la que se va a realizar la evaluación de dichos impactos. Las categorías de impacto no son sino los indicadores que reflejan la intensidad del impacto provocado por el producto. Ejemplos de categorías de impacto son el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, la eutrofización, uso de recursos de agua dulce, uso de energía primaria, etc.

2.1.1.2. Unidad funcional

La unidad funcional se refiere a la base de cálculo sobre la cual se efectuarán los balances de materia y energía (Universitat Politècnica de Catalunya. s.f.).

En otro sentido, la unidad funcional sirve de referencia para las entradas y salidas del sistema, de manera que asegura que éstas puedan ser comparadas con las entradas y salidas de otro sistema a la hora de realizar estudios comparativos (ISO 14044:2006).

El punto de partida de un estudio de ACV puede ser un producto específico, un objetivo o la necesidad de realizar una determinada función (Feijoo&Moreira, 2020).

2.1.1.3. Límites del sistema

Se deben identificar el conjunto de procesos unitarios o subsistemas que permiten producir el producto en estudio. Esto incluye las etapas como la obtención de las materias primas, los procesos de fabricación y transporte de los componentes del producto y, además de todas las fases del ciclo de vida del producto terminado. Es necesario decidir qué procesos y etapas del sistema se van a incluir en el estudio, así como los criterios que se utilizan para tal decisión y su compatibilidad con los objetivos del ACV (Universitat Politècnica de Catalunya. s.f.).

2.1.2. Análisis de inventario

En esta fase del ACV, se toman en cuenta todos los datos asociados al sistema bajo estudio para cuantificar la energía y los materiales consumidos, las emisiones al aire, al agua y todos los residuos que pudieran ser arrojados al entorno durante el ciclo de vida completo de un producto, proceso, material o actividad. En un sentido amplio, el inventario empieza en las materias primas y acaba con la gestión final de los residuos del producto (Feijoo&Moreira, 2020).

Todos y cada uno de estos aspectos ambientales se traducen en una lista de sustancias o flujos elementales que entran y salen de los límites del sistema. Los flujos elementales son los flujos de energía y de materiales que provienen de la naturaleza sin transformación previa realizada por el ser humano (petróleo, carbón, agua bruta, etc.) o que van directamente a la naturaleza (emisiones de CO₂, SO₂, vertidos de nitratos al agua, compuestos orgánicos volátiles, etc.).

El análisis de inventario es un proceso iterativo, ya que permite refinar y mejorar los datos, traducidos a su vez en los flujos de materiales y energía que

van surgiendo. Según Fava et al. (1991) el procedimiento recomendado para realizar el análisis de inventario incluye las siguientes etapas:

- Construcción del diagrama de flujo de acuerdo con los límites del sistema establecidos en la etapa de definición de objetivos y alcance.
- Recolección de datos de todas las actividades en el sistema de producción. Es necesario establecer el origen de esos datos: bibliográficos y/o medidas in situ.
- Cálculo de las cargas ambientales referidas a la unidad funcional.
- Normalización de los datos en términos de unidades.
- Balances de materiales, que permiten la interrelación de entradas y salidas entre los diferentes subsistemas.
- Cuantificación de los flujos de salida del sistema a la naturaleza o tecnosfera.
- Inventario global.
- Documentación de los cálculos.

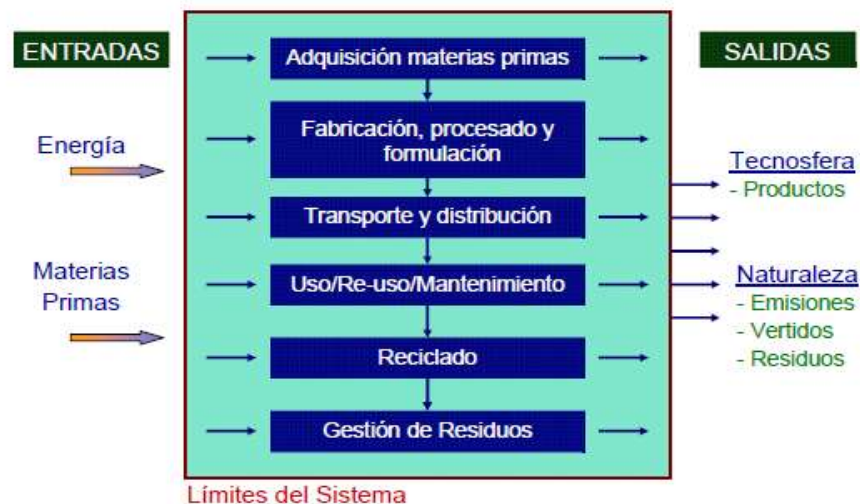


Figura 15. Diagrama de flujo estándar de inventario de ciclo de vida (Feijoo & Moreira, 2020).

2.1.2.1. Asignación de cargas ambientales

En el caso de sistemas que desarrollan más de una función o que fabrican más de un producto, se debe distribuir los aspectos ambientales entre los productos que generan. La asignación de las cargas ambientales a diferentes productos es necesaria cuando existan:

- Procesos con salidas múltiples, donde se generan diferentes productos, algunos de los cuales cruzan los límites del sistema.
- Procesos con entradas múltiples, donde es difícil establecer relaciones de causalidad entre entradas y emisiones.
- Procesos con reciclaje de lazo abierto, donde los residuos que salen de un sistema son utilizados como materias primas para otro sistema, fuera de los límites del sistema en estudio.

Cuando no es posible establecer una relación de causalidad, entre el producto y las cargas ambientales, se debe recurrir a métodos de asignación basados en valor económico, cantidad física (ej. masa, concentración) o una combinación de ambos (Universitat Politècnica de Catalunya. s.f.).

En este tipo de asignaciones las emisiones de cada producto se determinan en proporción a la masa, volumen, número de productos, contenido energético y otras unidades físicas que tenga el producto respecto de la producción total de la planta o proceso. También se utiliza este tipo de asignaciones cuando las emisiones están evidentemente asociadas a una característica física del producto.

2.1.3. Análisis de Impacto

La evaluación de impactos es un proceso que puede ser tanto cuantitativo como cualitativo, el cual busca caracterizar y evaluar los efectos de las intervenciones ambientales identificadas en la fase anterior de Análisis de Inventario. Además, este análisis puede incluir juicios y aspectos relacionados con los beneficios ambientales comparativos y los inconvenientes de diferentes sistemas.

Según la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) (1993), la evaluación de impactos se divide en tres fases principales:

Clasificación: Este es un paso cualitativo en el que se asignan las entradas y salidas a distintas categorías de impacto basadas en el tipo de efecto esperado sobre el ambiente. Esta asignación debe estar basada en un análisis científico de los procesos ambientales relevantes y responder a la pregunta: ¿Cuáles son los impactos ambientales esperados de cada entrada y salida del sistema? Los impactos se dividen en tres grandes categorías: Recursos Naturales, Salud Humana y Salud Ecológica.

Caracterización: Este paso es cuantitativo y evalúa la contribución relativa de cada entrada y salida dentro de su categoría de impacto asignada, totalizando las contribuciones dentro de cada categoría. La caracterización debe estar fundamentada en un análisis científico de los procesos ambientales relevantes y responder a las preguntas: ¿Cuál es la contribución potencial de una entrada o salida específica a diferentes impactos ambientales? y ¿Cuál es la contribución potencial total del sistema a diferentes impactos ambientales?

Valoración: Esta fase puede ser tanto cualitativa como cuantitativa y se centra en ponderar la importancia relativa de los diferentes impactos ambientales. La valoración puede incluir no solo análisis científicos, sino también valores éticos y socioeconómicos.

2.1.4. Interpretación

La fase de interpretación es el paso final del Análisis de Ciclo de Vida y tiene como objetivo analizar los resultados de las fases anteriores (inventario y análisis de impactos), para obtener conclusiones y recomendaciones útiles. Esta fase se compone de varios elementos clave:

Identificación de problemas significativos. Consiste en revisar los resultados obtenidos en las fases anteriores para identificar los impactos ambientales más relevantes. Se identifican qué etapas o procesos del ciclo de vida del producto,

son responsables de los mayores impactos ambientales y, por lo tanto, requieren mayor atención (ISO, 2006).

Evaluación de resultados. Implica una evaluación crítica y sistemática de los resultados para asegurar su validez y coherencia. Con ello se garantiza que los resultados obtenidos sean consistentes con los objetivos del estudio y que las conclusiones sean fiables (Guinée, 2002).

Conclusiones y recomendaciones. Se sintetizan las principales conclusiones del estudio y se formulan recomendaciones para mejorar el desempeño ambiental. La intención es proporcionar información útil y aplicable para la toma de decisiones, basada en los resultados obtenidos (Hauschild&Huijbregts, 2015).

Análisis de sensibilidad e incertidumbre. Se analiza cómo las variaciones en los datos y las suposiciones influyen en los resultados del ACV. Se evalúa la robustez de las conclusiones y la fiabilidad de los datos utilizados. (Heijungs&Suh, 2002).

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ESTUDIO DE CASO SISTEMAS PRODUCTIVOS AGAVE-MEZCAL.

Como se mencionó anteriormente, se utilizará la metodología de la Norma Internacional: ISO/DIS 14067: *“Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication”* para la estimación de la huella de carbono de los productos a analizar. Esta norma tiene como objetivo proponer los lineamientos, principios y requerimientos para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de un producto basándose de los Estándares Internacionales del Análisis de Ciclo de Vida de la familia de la ISO 14040, así como de la familia de la ISO 14020 para las declaraciones ambientales y su etiquetado.

Es importante mencionar que no se llevarán a cabo los lineamientos y pasos basados en la norma para la comunicación de la huella de carbono ya que este estudio pretende ser dirigido a la comunidad académica y a los productores de mezcal de manera informal y no de carácter político y reglamentario.

3.1. FASE I. Definición de objetivo y alcance

3.1.1. Objetivo del ACV

Objetivo de la estimación de la HCP

El objetivo es calcular la contribución potencial de 1 botella de vidrio de 750 ml de mezcal joven, derivado de los diferentes escenarios de producción al calentamiento global expresado como CO₂e, cuantificando las emisiones de GEI a lo largo del ciclo de vida de este producto.

Razones del estudio

Las razones para llevar a cabo este estudio se describen a continuación:

Contribución al conocimiento existente: Este estudio busca enriquecer de nueva información relevante al conjunto de conocimientos ya existentes en el campo del análisis de ciclo de vida en productos, la huella de carbono de bebidas alcohólicas en México y los impactos medioambientales ocasionados por la fabricación del mezcal. Al identificar vacíos o áreas poco exploradas y analizadas, se podrá enriquecer la comprensión actual del contexto socio-ecológico del mezcal.

Solución a problemas actuales: Existe una necesidad real y urgente de abordar la problemática ambiental en diversas áreas, una de ellas y en este estudio se centra en la generación de impactos ambientales y gases de efecto invernadero a consecuencia de la fabricación de productos consumibles y de moda actualmente. Mediante este estudio, se busca identificar los puntos o fases críticas del proceso de elaboración del mezcal donde se emiten los mayores impactos para de este modo proponer mejoras y soluciones concretas en el sistema, buscando reducir la huella de carbono del producto de interés.

Relevancia y pertinencia: La temática de este estudio es relevante y pertinente en el contexto actual y su realización es necesaria para mantenernos actualizados y a la vanguardia en nuestro campo de estudio. Al abordar cuestiones actuales y emergentes, este trabajo pretende ser divulgado y ser de

interés para la comunidad académica, los productores participantes en este estudio y otros actores interesados.

Aplicación del estudio

El estudio tiene la intención de ser un medio de comparación con otros estudios realizados o que se lleguen a realizar sobre la huella de carbono en bebidas alcohólicas, así como también que sirva de utilidad para replicar la metodología de la ISO 14067 llevada a cabo en este estudio.

La audiencia a la que se pretende llegar este proyecto de investigación es a todos los productores de mezcal a los que se les aplicó el estudio para que conozcan la huella de carbono asociada de su producto y tengan presente el impacto ambiental y las posibles soluciones que pueden llevar a cabo para intentar mitigar sus impactos ambientales. Así mismo se tiene la intención de que pueda llegar a personas investigadoras en estos temas y al área académica en general para que realicen investigaciones similares, amplíen el marco de estudio y poder tener un contexto más general y a su vez profundo de la situación.

3.1.2. Alcance

3.1.2.1. Unidad Funcional

La unidad funcional que se seleccionará en este estudio corresponde a 1 botella de vidrio de 750 ml de mezcal joven artesanal, incluyendo 1 corcho/tapa, 1 etiqueta y la fracción correspondiente a su caja de embalaje.

3.1.2.2. Descripción del sistema y área de estudio

El sistema-producto consiste en la fabricación de una botella de mezcal joven derivado de los diferentes escenarios de producción a partir de la técnica de elaboración artesanal, mediante un enfoque de ciclo de vida de la cuna a la tumba. Se estudiarán tres sistemas productivos de mezcal en México, identificados como: SP-1, SP-2, SP-3 (tabla 10).

Tabla 10. Sitios de estudio y especies empleadas.

#Sitio de estudio	Lugar	Tipo de producción	Especies de agave empleadas
SP-1	Localidad de Tumbisca, Michoacán.	Artesanal	<i>A. Angustifolia</i> , <i>A. Cupreata</i> , <i>A. Inaquidens</i> .
SP-2	San Luis Atolotitlan, Puebla, Mex.	Artesanal	<i>A. marmorata</i> , <i>A. Potatorium</i> , <i>A. Convallis</i> , <i>A. karwinski</i> .
SP-3	Santiago Matatlán, Tlacolula, Oaxaca, Mex.	Artesanal	<i>A. Angustifolia</i> , <i>A. Potatorium</i> , <i>A. Marmorata</i> , <i>A. Convallis</i> , <i>A. Rhodacantha</i> , <i>A. Karwinskii</i> .

El escenario **SP-1** se identifica por ser una vinata/palenque mezcalero en la localidad de Tumbisca, municipio de Morelia, Michoacán (fig.16). En este palenque mezcalero se emplea la técnica artesanal para la elaboración de mezcal. El producto final es la botella de mezcal joven.

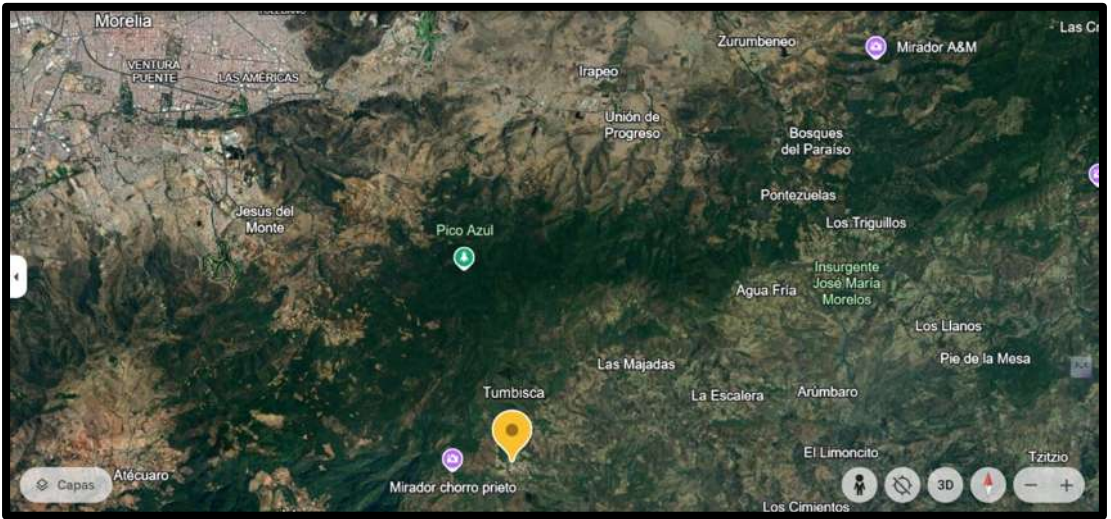


Figura 16. Ubicación geográfica del SP-1 Mich.

El sistema productivo **SP-2** se localiza en la comunidad de San Luis Atolotitlán, municipio de Caltepec, Puebla (fig. 17). En esta vinata a estudiar se produce

mezcal de tipo artesanal. En la elaboración del mezcal se utiliza una mezcla de diferentes especies de agave como: *A. marmorata*, *A. Potatorum*, *A. Convallis*, *A. karwinski*.

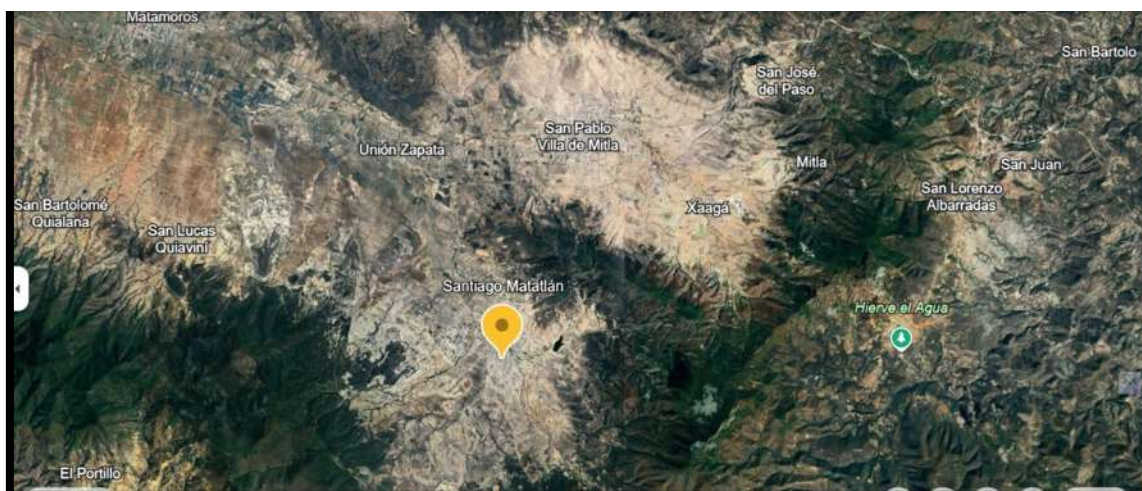


Figura 17. Ubicación geográfica del SP-2 Pue.

El sistema productivo **SP-3** se caracteriza por estar ubicado en la localidad de Santiago Matatlán, Oax. (fig. 18). En esta vinata mezcalera se produce mezcal de tipo artesanal y se emplean distintas especies de agave para su producción como: *A. Angustifolia*, *A. Potatorum*, *A. Marmorata*, *A. Convallis*, *A. Rhodacantha*, *A. Karwinskii*.

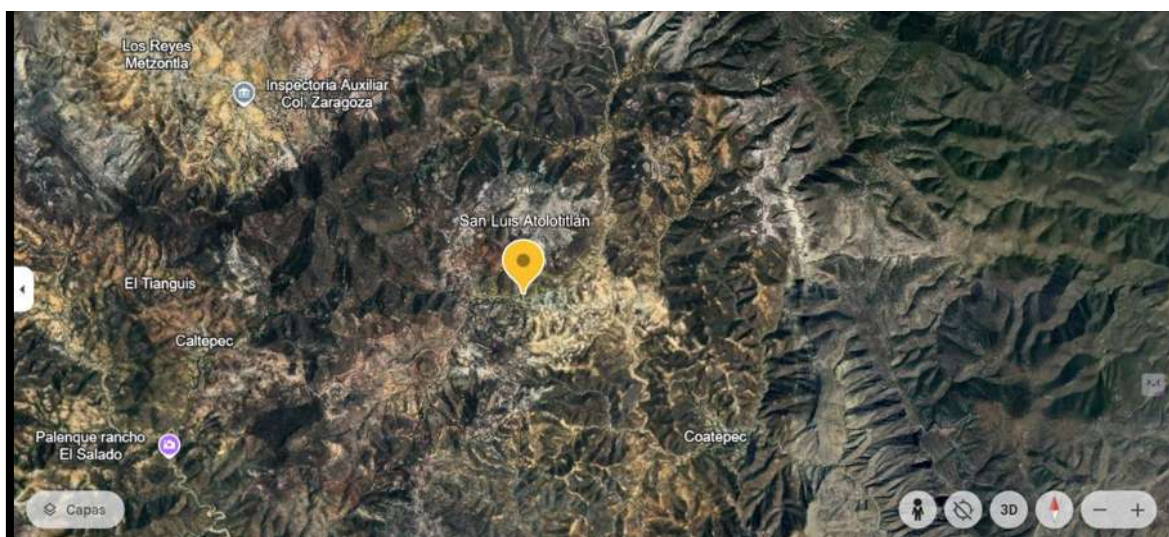


Figura 18. Ubicación geográfica del SP-3 Oax.

En la siguiente ilustración se pueden observar las regiones de México que abarca este estudio para ubicar geográficamente donde se encuentran (fig. 19).

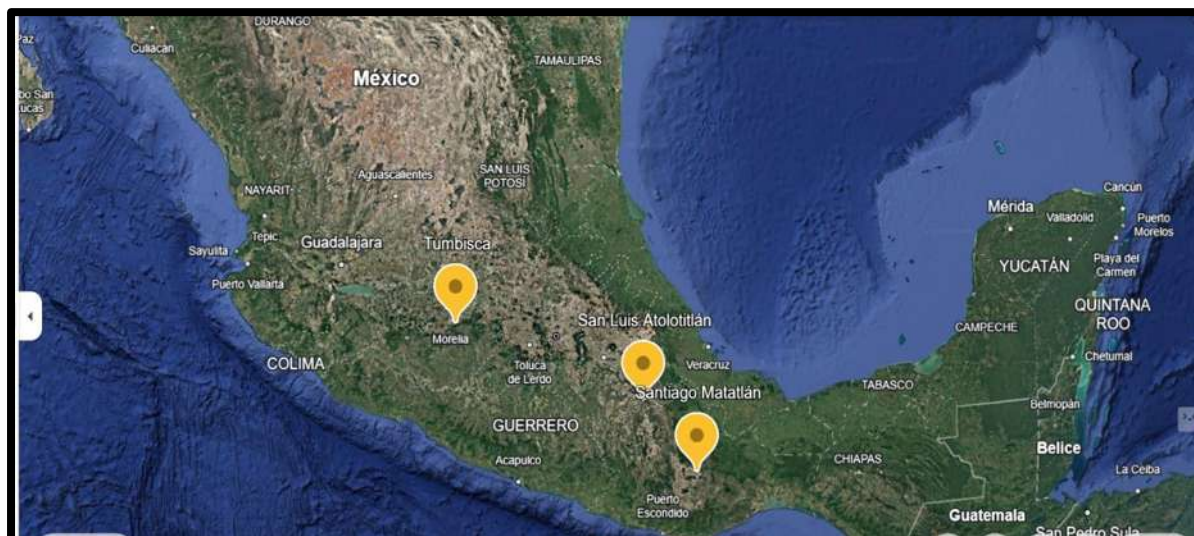


Figura 19. Ubicación geográfica-espacial de los palenques estudiados.

3.1.2.2.1. Límites del sistema

Se empleará un estudio de estimación de Huella de Carbono de Producto desde la perspectiva de ciclo de vida, el sistema es de la cuna a la tumba, es decir, se contemplan los impactos ambientales desde la extracción de los materiales para su fabricación hasta el fin de vida del producto (figura 20). En la figura 21 se muestran los límites del sistema a estudiar.

El sistema-producto a analizar en este estudio se limita a las fases de:

- a) Adquisición de materias primas y fase agrícola (cultivo de agave).
- b) Transporte de materias primas a la vinata/palенque.
- c) Proceso de producción en vinata.
- d) Embalaje de botellas de mezcal (incluye los impactos por la producción de insumos, vidrio, cartón y plástico).
- d) Transporte al centro de distribución (en caso de que sea).
- e) Uso del producto por parte del cliente.
- f) Disposición final del producto.



Figura 20. Representación de las fases del ACV contempladas en este estudio.

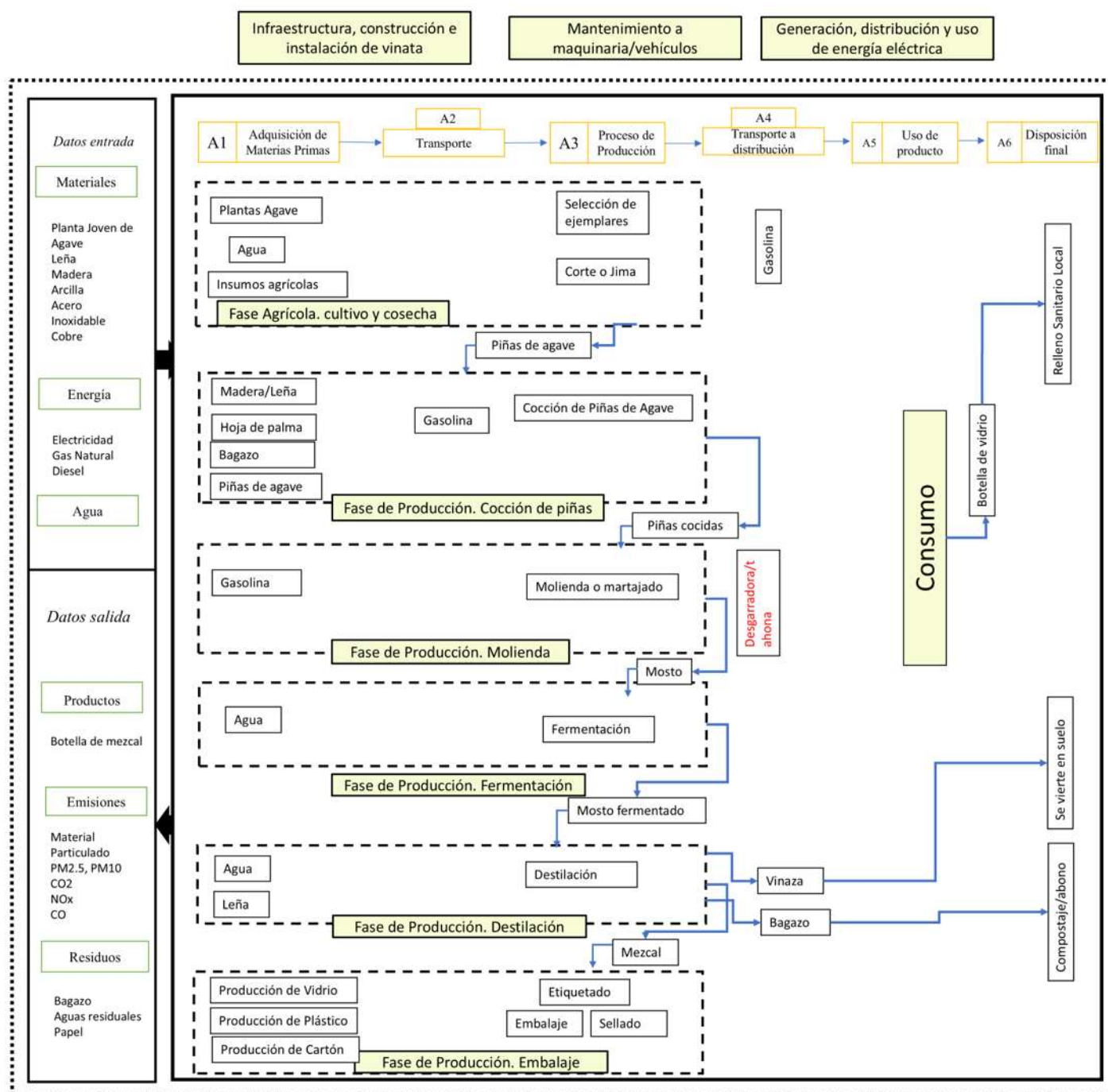


Figura 21. Límites del sistema contemplados en este estudio.

A continuación, se explican las fases que se incluyen dentro del sistema.

- **Fase de extracción de materias primas**

Dentro de esta fase se consideraron todos los insumos necesarios para la obtención de la principal materia prima, en este caso el agave. En los tres sistemas productivos (SP) se incluyó la fase de cultivo de la planta o vivero y todos sus insumos requeridos como agua para riego y polímeros empleados en las bolsas de cultivo o almácigos. Otra de las consideraciones en esta fase fue la cosecha de las piñas de agave mediante el corte o jima, aunque para ninguno de los escenarios se identificaron insumos, ya que el mencionado proceso se realiza manualmente por medio de un machete.

En esta fase se identificaron varias entradas de materia y energía como agua necesaria para riego del cultivo, semillas de agave empleadas, insumos agrícolas y en algunos casos combustibles para maquinaria. No se contemplaron insumos agrícolas como fertilizantes o agroquímicos ya que todos los sistemas estudiados son orgánicos y no emplean ninguno de estos, a excepción del palenque mezcalero de Michoacán (SP1) que llega a emplear cal en el cultivo del agave.

- **Fase de transporte de materias primas a vinata**

En esta fase se tomó en cuenta el impacto derivado del transporte de todos aquellos insumos requeridos para la fase de producción teniendo en cuenta el vehículo utilizado, el peso transportado y la distancia recorrida. Se incluye el transporte de plásticos, botellas de vidrio, etiquetas para su embalaje, así como el transporte de la leña y el transporte de las piñas de agave a la vinata.

- **Fase de producción en vinata**

Esta fase incluye varias etapas que describen cada proceso por el que pasa la materia prima hasta su transformación final a producto (botella de mezcal). Constituidas por: 1. Cocción de piñas. 2. Molienda. 3. Fermentación. 4. Destilación. 5. Embalaje.

1. La primera etapa la constituye la cocción de las piñas, esta etapa se realiza de manera distinta dependiendo el tipo o técnica de elaboración del mezcal, inclusive si se trata de la misma técnica como en este caso de estudio (artesanal), por lo que puede haber diversas características e insumos distintos entre cada una de ellas. Para la elaboración del mezcal artesanal es necesario contar con un pozo de tierra, mampostería o barro, recubierto de tierra o piedra volcánica. En este caso, los tres sistemas productivos hacen uso de un pozo de tierra. En este estudio no se consideró el impacto asociado a la elaboración del pozo.

Se consideraron como entradas el combustible empleado para la hidrólisis de las piñas de agave el cual para los todos los escenarios fue leña de monte de distintas especies forestales, así como biomasa seca (bagazo seco/hojas de palma secas) para cubrir y tapar el pozo una vez iniciada la cocción y algunos otros insumos como plásticos para recubrir el pozo. No se consideraron como insumos la tierra y las rocas necesarias para tapar el pozo ya que no se conoce con exactitud la cantidad de veces que llegan a emplear estos mismos insumos en otras tandas de producción, lo que dificulta medir su impacto real.

2. La siguiente etapa corresponde a la molienda o martajado de las piñas de agave una vez cocidas, en esta etapa se pueden utilizar trituradoras o desfibriladores a base de gasolina o eléctricos, como en el caso del SP-1 y SP-2 donde se emplean un molino/ensilador a base de gasolina. Sin embargo, el método más utilizado en la técnica de producción artesanal es a mano con la ayuda de machetes o mediante una tahona chilena (movida por caballos) como es el caso del SP-3.

3. La tercera etapa dentro de la fase de producción en vinata se refiere a la fermentación del mosto obtenido en la etapa anterior para así generar los alcoholes que le darán el sabor al mezcal, en esta etapa se considera como entrada al sistema el agua que se necesitará para el llenado de la tina o depósito donde se fermentará el mosto, obteniendo como residuos o salidas el bagazo del agave. En esta etapa no se consideraron los impactos ambientales derivados de la elaboración de las tinas de madera. Cabe resaltar que en ninguna de los tres escenarios se añaden fermentos comerciales al proceso, el

proceso de fermentación se realiza de manera natural con la microbiota nativa misma que va generando el bioproceso.

4. Posteriormente se procede a la etapa de destilación, donde en los tres SPs se identifican las entradas de agua potable y leña para la combustión, los cuales son utilizados en alambiques de cobre y/o madera para el destilado del agua fermentada y obtener de esta manera el producto final. Cabe señalar que en los 3 SPs se realizan 2 destilaciones para la obtención del mezcal. Para esta etapa no se consideraron los impactos ambientales derivados de la fabricación de los alambiques.

5. Una vez teniendo el mezcal ya puro y destilado, se procede a la etapa de embalaje dentro de la misma vinata, en donde se procede a llenar la botella de vidrio, etiquetarla, sellarla y almacenar en cajas de madera o cartón de tal manera que el producto no sufra alteraciones ni accidentes en su transporte al centro de distribución o venta (según sea el caso). Para ello se identifican las siguientes entradas de materia como: la botella de vidrio, papel o plástico adherible, tapa de plástico y cajas de madera/cartón. Para esta etapa se consideró el procesamiento industrial del moldeo por inyección tanto del vidrio como del plástico utilizado.

- **Fase de transporte a centro de distribución**

En esta fase únicamente se tomó en cuenta el uso de combustible empleado derivado del vehículo utilizado y la distancia recorrida para transportar el producto final: transportar las botellas de mezcal joven de 750 ml. al centro de distribución/venta. El SP-3 no cuenta con esta fase ya que el producto final embalado se consume/vende de manera local por lo cual no requiere de transportarlo a algún centro de distribución como si lo es en el caso del SP-1 y SP-2, mismos que emplean un vehículo de carga pesada para este proceso.

- **Fase de uso de producto**

En esta fase del sistema no se incluyen entradas de materia, únicamente las salidas derivadas de los residuos del producto una vez que se ha consumido.

Para la cuantificación de los impactos, se consideró la manera de disposición del residuo una vez terminado su ciclo de vida. Para este caso se consideró el

supuesto de que las botellas de mezcal vacías se disponían de manera normal en la basura como residuos sólidos urbanos, los cuales son dispuestos en el relleno sanitario municipal. Por lo tanto, se hizo el supuesto de que los residuos propios del vidrio, cartón, papel y plástico contenidos en la botella se disponían en el relleno sanitario municipal, esto debido a que el 84% de los residuos sólidos urbanos tienen como destino final este punto (SEMARNAT, 2020).

3.1.2.2.2. Exclusión del sistema

Dentro de este estudio no se tomará en cuenta el impacto derivado de:

- ✖ La construcción e instalación de la vinata.
- ✖ La fabricación y mantenimiento de la maquinaria y/o vehículos empleados.
- ✖ La generación y consumo de energía eléctrica empleada en las instalaciones de la vinata.
- ✖ La elaboración del pozo de tierra usado en la etapa de cocción.
- ✖ La fabricación de las tinas de madera usadas en la etapa de fermentación.
- ✖ La fabricación de los alambiques de madera/cobre usados la etapa de destilación.
- ✖ La extracción del suelo/tierra requeridos para tapar el pozo en cada horneada.
- ✖ El uso y extracción del sustrato requerido para el cultivo y germinación del agave.
- ✖ El transporte de las piedras volcánicas a la vinata.
- ✖ El impacto por la producción y uso de la malla sombra utilizada en los viveros de agave.
- ✖ El uso de energía eléctrica para iluminación del espacio de producción, ya que es mínimo el consumo y el espacio no es tan grande por lo que no se considera un impacto relevante.
- ✖ La extracción del suelo/tierra para las etapas requeridas ya que su vida útil depende mucho de su uso tanto para el cultivo como para el tapado del pozo para la cocción.

Todo ello se tomó en cuenta debido a su larga vida útil y además de que no se conocen los datos y cantidades reales de su fabricación y estimarlos generaría mucha incertidumbre.

3.1.2.2.3. Cuantificación.

La etapa de ciclo de vida que necesita mayor atención y tiene el potencial de contribuir mayoritariamente a la huella de carbono a diferencia de las demás etapas es la etapa de producción en vinata ya que por sus fases de producción como la cocción o destilación se emiten importantes cantidades de emisiones de GEI derivadas de la combustión de la biomasa. Para la cuantificación de dichas emisiones, no se calcularán físicamente con equipos especializados, si no mediante el apoyo y uso del software especializado: OpenLCA (versión 2.4.1) y la base de datos de *ecoinvent 3.11*, donde se le proporcionará la cantidad y calidad de los insumos y procedimientos contemplados (tipo de especie/biomasa a combustionar, etc.) para que se obtenga un aproximado de la cantidad de emisiones liberadas.

3.1.2.2.4. Criterios de corte

Se estableció un criterio de corte del 1% en masa y energía, por lo que se excluyeron del análisis aquellos insumos cuya contribución fuera inferior a dicho umbral.

3.1.2.3. Tipos y fuentes de datos

Los datos e información de cada uno de los sistemas productivos estudiados se obtuvieron tanto de fuentes primarias con visitas al sitio de la vinata/palенque mezcalero, como fue el caso del SP-1 (Tumbisca, Mich.), así como de fuentes secundarias para el caso del SP-2 y SP-3 (San Luis Atolotitlán, Pue. y Santiago Matatlán Oax. respectivamente), es decir de datos e información proporcionada de primera mano por los maestros mezcaleros encargados de la producción en el palenque/vinata.

También se recolectó información de bases de datos estandarizadas con ayuda de software especializado, seleccionando datos replicables al sistema

estudiado o mediante literatura relacionada o estudios realizados similares con este tipo de sistema-producto.

3.1.2.4. Cambio de uso de suelo

En este trabajo de investigación no se consideró un impacto ambiental derivado de un cambio de uso de suelo directo por las actividades propias del ciclo de vida de la botella de mezcal, esto debido a que en el espacio temporal de la investigación (<1 año) no se identificó un cambio en el uso del suelo específicamente para la etapa de cultivo del agave, ya que el espacio empleado para el cultivo ya se tenía destinado para dicho fin desde hace tiempo.

A continuación, se presenta una tabla de las especies de agave que se estudiaron en este trabajo.

Tabla 11. Especies de agave identificadas en este trabajo.

Agave	Tipo de Cultivo
<i>A. Angustifolia</i> (Espadín) (SP-1, SP-3)	Cultivado
<i>A. Convallis</i> (Jabalí) (SP-2, SP-3)	Silvestre/ Cultivado
<i>A. Marmorata</i> (Pichomel, tepeztate) (SP-2, SP-3)	Silvestre/ Cultivado
<i>A. Cupreata.</i> (SP-1).	Cultivado
<i>A. Inauidens</i> (SP-1)	Cultivado
<i>A. Karwinskii</i> (SP-2, SP-3)	Silvestre/ Cultivado
<i>A. Potatorum</i> (SP-3)	Silvestre/ Cultivado

<i>A. Rhodacantha (SP-3)</i>	Silvestre/ Cultivado
------------------------------	----------------------

3.1.2.5. Procedimientos de asignación

Las normas ISO establecen directrices para aquellos estudios que incluyen procesos multifuncionales (ej. que obtienen numerosos productos y co-productos) con el fin de repartir las cargas ambientales entre las distintas salidas del sistema.

La jerarquía establecida consiste en la subdivisión de procesos, expansión del sistema, asignación basada en parámetros físicos y asignación basada en otros parámetros (Bjorn et al., 2018).

En el caso de este ACV, los sistemas estudiados poseen características similares ya que se obtiene un solo producto utilizado, una botella de mezcal joven (750 ml).

Este trabajo de investigación no contiene co-producto con asignación, por lo que no existe ninguna otra asignación en el sistema mas que la expresada en el LCI y porque solo hay un producto a la salida del sistema.

Debido a lo anterior, a totalidad de los impactos ambientales de cada sistema son referidos a la unidad funcional (1 botella de mezcal joven de 750 ml).

3.1.2.6. Horizonte temporal de los datos

Se establece en este estudio que los datos y resultados reportados tienen una injerencia de fiabilidad de 1 año, ya que es el periodo en el que se realizan los ciclos de producción y cosecha en la mayoría de las etapas, por lo que se sugiere que para efectos de reproducibilidad y fiabilidad en los datos se vuelvan a hacer estudios al año siguiente de este estudio, teniendo en cuenta que pudieran haber diferencias particulares en los datos por etapas, como la cantidad de leña a emplear, distancias de transporte más cortas u obtención de materias primas distintas.

3.1.2.7. Supuestos por etapas de ciclo de vida de producto

Etapas de extracción de materias primas

- Dentro de la etapa de cosecha/jima de las cabezas del agave, se hizo el supuesto de que por cada planta de agave jimada se obtenían 20 kg de residuo de la hoja/penca en peso húmedo y que éste residuo se disponía en el mismo sitio de jima para su degradación en suelo, todo esto aplicable para los tres escenarios.
- Para la etapa de cosecha/jima se supone una humedad del 86% de las hojas de penca de agave, esto de acuerdo con Caballero M, et al. (2023).

Etapas de cocción:

- Se supone una depreciación en peso de las piñas de agave una vez cocidas del 25% en peso por la evaporación de los jugos contenidos y humedad, por lo que una vez que salen de la etapa de cocción a la etapa de molienda contienen un 25% menos del peso total de entrada.

Etapas de uso:

- Los consumidores desechan la botella de mezcal una vez consumida y completamente vacía en la basura doméstica y que ésta llega a los rellenos sanitarios municipales.

Etapas de residuos/fin de vida:

- Para la etapa de fin de vida se supone que el empaque primario y secundario (cartón) se pasa a acopio, luego a relleno sanitario.
- Se supuso que la botella de vidrio no se recicla, sino que termina en el relleno sanitario local.

- Se supuso que el corcho o tapón tampoco se recicló y que termina en el relleno sanitario local.
- Para los tres casos de estudio se supuso que se realizaba un tratamiento especial de los residuos de vidrio y plástico en el relleno sanitario.

3.1.2.8. Limitaciones del estudio de Huella de Carbono

Las limitaciones de este estudio, se enfocan en la cuantificación de una sola categoría de impacto: calentamiento global (GW) siguiendo la metodología de la ISO 14067, al considerar una metodología basada en un ciclo de vida donde se toman en cuenta la cuantificación de impactos desde la extracción de materias primas hasta su fin de vida, se pueden obtener datos y resultados que pueden ser de suma importancia para otras categorías de impacto, como lo es el consumo de agua, la pérdida de biodiversidad o el cambio de uso de suelo, por mencionar algunas. Sin embargo, se hace especial énfasis en que esas otras categorías de impacto deben ser tomadas en cuenta en estudios futuros de este tipo, independientemente si solo se quiere medir huella de carbono, en este estudio sólo se presenta la huella de carbono del producto por efectos metodológicos y previamente mencionados en otros apartados, pero no se resta la importancia que tienen las demás categorías de impacto que son igual de significativas.

3.1.2.9. Impactos a evaluar

El presente ACV se basará en la medición de impacto de punto medio. Siguiendo la normativa de la ISO 14067, la cual indica que, para la cuantificación de la huella de carbono de producto, se evaluará únicamente la categoría de impacto de: calentamiento, el cual su factor de caracterización es el de Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential, GWP), expresado como Kg de CO₂eq.

La categoría de: Cambio Climático, es el indicador internacionalmente estandarizado para medir la contribución de GEI al cambio climático.

Introducido por el IPCC, dicha métrica cuantifica el forzamiento radiactivo acumulado sobre 100 años para cada GEI con relación con el CO₂ a partir de la siguiente fórmula:

$$GWP = \text{Masa del gas (kg)} \times PCG (\text{factor de conversión})$$

Donde:

Masa del gas: Cantidad de gas que se emite o se está considerando en kg.

PCG (Potencial de Calentamiento Global): Factor que indica cuántas veces más caliente es un gas específico en comparación con el CO₂ (considerado como valor 1) durante un periodo de tiempo determinado (normalmente 100 años).

3.1.2.10. Método de evaluación de impactos

La evaluación de impacto de ciclo de vida de la producción de 1 botella de mezcal joven de 750 ml se llevó a cabo por el método “IPCC 2021” mediante la categoría de impacto de punto medio: calentamiento global, en el software “OpenLCA” versión 2.4.1.

3.2. FASE II. Etapa de Análisis de Inventario de Ciclo de Vida

3.2.1. Recolección y cálculo de datos

La recolección de los datos presentados a continuación se realizó con ayuda de los maestros productores de mezcal de cada sitio, mismos que nos proporcionaron toda la información y datos requeridos para el correcto análisis comparativo de los tres distintos sistemas productivos evaluados.

Para el caso del sistema productivo SP-1 (Tumbisca, Mich.) se realizó una visita al palenque de producción donde se obtuvieron los datos de manera

directa, y así mismo presenciar las actividades que se realizan al momento de la producción del mezcal.

A continuación, se presentan los datos seccionados por fases del ciclo de vida, mediante entradas y salidas de materia del sistema y normalizados los valores por unidad funcional, se describen también los flujos de entradas y salidas utilizados en el software OpenLCA.

Fase de extracción de materias primas

Dentro de esta etapa se consideraron como insumos el polietileno de baja densidad (LDPE) usado en la etapa de cultivo específicamente en las bolsas de germinación agrícolas (25x25cm), además del poliestireno usado para los almácigos de germinación (SP-2, SP-3).

A su vez se tomaron en cuenta flujos elementales provenientes de la naturaleza para la etapa de cultivo del agave, como el agua y las semillas de agave para su crecimiento.

Para todos los escenarios, el agua requerida para los procesos era tomada de un cuerpo de agua cercano al sitio, específicamente de ríos y en particular para el escenario SP-1 se requirió combustible para bombear el agua de riego.

Así mismo para los tres SPs, el sustrato requerido para la germinación de las plántulas, se elaboró mediante una mezcla de tierra de monte con abono de excremento animal. Sin embargo, este recurso no fue tomado en cuenta para el impacto de la huella de carbono.

Como se mencionó anteriormente se visitó el sitio de cultivo en vivero del Sistema Productivo 1 en la localidad de Tumbisca, Michoacán; de donde se recolectaron los datos de inventario para este sistema, en las ilustraciones se puede apreciar el sitio de cultivo y cómo se llevan a cabo las plantaciones de agave para este sistema.

En la figura 22 se muestra el complejo del vivero y los surcos donde son germinadas las semillas y plántulas de *A. Cupreata*, se puede apreciar también que en uno de los surcos donde las plántulas son más pequeñas, se les añade un poco de cal sobre la tierra para evitar la presencia de insectos que puedan afectar a la planta.



Figura 22. Sitio de cultivo de plántulas de agave (SP-1).

Una vez las plántulas crecen y toman una altura adecuada (aprox. 1.5 años), son retiradas para trasplantarlas en monte (figura 23) donde

permanecerán aproximadamente 7 años con cuidados menores y riegos únicamente por lluvias para cuando se encuentren maduras y estén listas para la jima/cosecha de las piñas.



Figura 23. Sitio de trasplante de ejemplares adultos.

La fase de extracción de materias primas y recolección de datos continua con el paso más importante, la jima o cosecha de las piñas o cabezas del agave una vez maduro, los cuales son seleccionados por los maestros mezcaleros en campo (figura 24). Este proceso para los tres escenarios se realiza de manera manual con ayuda de machetes (figura 25). Las pencas/hojas de agave que resultan de esta actividad son dispuestas en el mismo sitio de la jima para su degradación en suelo, en este estudio se consideró una humedad del 86% de las pencas de agave, dato útil para obtener el impacto ambiental producido en peso seco de este residuo.



Figura 24. Selección de agaves maduros para jima (SP-1).



Figura 25. Jima del agave para la obtención de las piñas (SP-2).

A continuación, se presenta en la tabla 12 el inventario de ciclo de vida para esta fase, todas las cantidades presentadas corresponden a la unidad funcional.

Los flujos que se seleccionaron en el software están descritos en el apartado de elemento usado y en todos los casos o en la mayoría de ellos se seleccionó

el flujo: {RoW} el cual significa Rest of the World y esto aplica para cualquier producción o proceso en cualquier parte del mundo, ya que es muy difícil o no existen aún los flujos específicos para la región en la cual estamos realizando nuestro estudio, en este caso México.

Tabla 12. Inventario de Ciclo de Vida de la Fase de Extracción de Materias Primas por Unidad Funcional (1 botella de mezcal artesanal joven de 750 ml.).

Entradas Conocidas desde la tecnosfera (materiales/combustibles)	Proceso	Cantidad SP-1 (UF)	Cantidad SP-2 (UF)	Cantidad SP-3 (UF)	Unidad	Elemento Usado/Proveedor
Polietileno (LDPE)	Cultivo		0.0105		kg	Packaging film, low density polyethylene {RoW} production
Moldeo por inyección	Cultivo		0.0105		kg	injection moulding/ Cutoff, U-RoW
Poliestireno (almácigos)	Cultivo			0.1500	kg	Polystirene production, general purpose/Cutoff, U-RoW
Cal agrícola	Cultivo	0.02			kg	Quicklime production, milled, loose/quicklime, milled, loose /Cutoff, U- RoW
Gasolina	Cultivo	6.48			lt	Petrol, unleaded burned in machinery/Cutoff, U-GLO
Entradas Conocidas desde la naturaleza	Proceso	Cantidad SP-1 (UF)	Cantidad SP-2 (UF)	Cantidad SP-3 (UF)	Unidad	Elemento Usado/Descripción
Agua	Cultivo	4.381	1.339	4.160	lt	Water, river
Semillas	Cultivo	2.921E-06	0.0007		kg	grass seed production, organic, for sowing /Cutoff, U-RoW
Plantas/agaves cosechados	Cosecha/jimena	0.1461	0.6176	2.9167	kg	
Salidas conocidas a la tecnosfera y naturaleza. Residuos y emisiones	Proceso	Cantidad SP-1 (UF)	Cantidad SP-2 (UF)	Cantidad SP-3 (UF)	Unidad	Elemento Usado/Descripción

Hojas de poda (pencas)	Jima/cosec ha	0.4081	0.2281	0.2872	kg	leaves degradation inf field, IPCC
Plantas de agave	Cultivo	0.087	0.04	0.06	kg	Flujo de referencia
Cabezas de agave	Jima/cosec ha	9.4737	5.2941	6.666	kg	Flujo de referencia

Fase de Producción en Vinata

En esta fase se tomaron en cuenta los siguientes insumos y procesos para todas las etapas que comprende la producción en vinata:

- Producción de polietileno de baja densidad constituido en bolsas negras de plástico usadas en el SP-1 para cubrir el pozo de tierra en la cocción de las piñas.

- Combustible de gasolina empleado en el SP-1 y SP-2 específicamente en el proceso de molienda para el uso de un molino/ensiladora comercial, además de ser usado en el proceso de cultivo para la extracción de agua con el uso de bombas hidráulicas (SP-1).

- Producción de botellas de vidrio blanco de 400 gr.

- Producción de polietileno de alta densidad (HDPE) usado en las tapas de las botellas de vidrio.

- Producción de cartón usado para las cajas en las que son transportadas las botellas de vidrio.

- Producción de cloruro de polivinilo (PVC) usado en las etiquetas que llevan las botellas del producto final.

- Las cabezas de agave, las cuales son obtenidas de la etapa de corte/jima, la cantidad varía entre sistemas productivos, debido a la cantidad que emplean

cada uno en la cocción derivada del tamaño y capacidad que tiene cada pozo de tierra.

-Piedra volcánica obtenida cerca del sitio de producción, para el análisis de impacto en el software *OpenLCA*, se utilizó específicamente la piedra volcánica de basalto para la evaluación de su impacto.

-Hojas de palma usadas en el SP-1 para recubrir el pozo de tierra.

-Leña de monte usada en las etapas de cocción y destilación para la generación de calor. En cada SP se emplea una especie forestal distinta de leña considerando su valor de poder calorífico. Para este proceso se adaptaron dos flujos distintos dentro del software con el objetivo de realizar un análisis de sensibilidad que nos permita identificar las diferencias en el impacto de huella de carbono entre los dos flujos, esto se hace porque se considera que el proceso de combustión de la leña es uno de los que más impacto tiene en la huella de carbono.

-Bagazo de agave seco usado en el SP-2 para recubrir el pozo de tierra y propiciar la generación de calor.

-Agua de río cercano al sitio de producción de cada SP usadas en las etapas de fermentación para el llenado de tinajas con mosto y para la destilación de los jugos fermentados.

Del mismo modo se consideraron las salidas propias de cada etapa y proceso productivo, identificando las siguientes:

-Carbón residual o cenizas, generadas en las etapas de la cocción de las piñas de agave y en la etapa de destilación por el uso de leña.

-Vinazas resultantes de la etapa de destilación. En los tres sitios las vinazas resultantes se desechan al suelo en el mismo sitio de producción.

-Bagazo residual resultante en la etapa de fermentación y molienda, en los tres SPs, el bagazo residual se deja secando en sitio y se degrada en el mismo sitio, En SP-1 y SP-2 se suele emplear cierta cantidad de este residuo para rellenar los caminos de tierra o como alimento a las vacas una vez secos, sin

embargo, como no es habitual y su cantidad destinada es mínima, se considera que se degradan en el mismo sitio.



Figura 26. Cabezas de agave jimadas en campo.

Tabla 13. Inventario de Ciclo de Vida de la etapa de Producción en palenque/vinata por la producción de 1 botella de mezcal joven de 0.750 lt.

Entradas Conocidas desde la tecnosfera (materiales/combustibles)	Proceso	Cantidad SP-1 (UF)	Cantidad SP-2 (UF)	Cantidad SP-3 (UF)	Unidad	Elemento Usado/proveedor
Polietileno de baja densidad (bolsas de plástico)	Cocción	0.0006			kg	Packaging film, low density polyethylene {RoW} production
Inyección por molde	Cocción	0.0006			Kg	injection moulding/ Cutoff, U- RoW
Gasolina	Molienda	0.0079	0.0079		MJ	Petrol, unleaded, burned in machinery {GLO}
Botellas de vidrio	Empacado	0.400	0.356	0.400	kg	Packaging glass, White {RoW} Production

Tapas/corchos	Empacado	0.007	0.006	0.007	kg	polyethylene production, high density, granulate /Cutoff, U- RoW
Cajas de cartón	Empacado	0.016	0.014	0.016	kg	Corrugated board box {RoW} Production
Etiquetas	Empacado	0.004	0.004	0.040	kg	Polyvynil chloride, unspecified polymerization, weight average {RoW} Production
Entradas Conocidas desde la naturaleza	Proceso	Cantidad SP1 (UF)	Cantidad SP2 (UF)	Cantidad SP3 (UF)	Unidad	Elemento Usado/Descripción
Cabezas de agave	Cocción	9.47	5.294	6.67	kg	
Piedra volcánica	Cocción	2.36		2.0	kg	Basalt
Hojas de palma	Cocción	0.0095			kg	biomass open burning
Combustión de leña	Cocción	3.55	1.764	0.875	kg	-Wood combustión, mix of combustión gases
Bagazo seco	Cocción		0.070		kg	biomass open burning
Agua	Fermentación	0.8289	2.964	1.333	lt	Water, river
Agua	Destilación	0.236	10.588	4.166	lt	Water, river
Combustión de leña	Destilación	7.100	5.294	1.750	kg	-Wood combustión, mix of combustión gases
Combustión de leña	Destilación	135.0	91.302	33.6	MJ	heat production, mixed logs, at wood heater 6KW/Cutoff, U-RoW
Salidas conocidas a la tecnosfera y naturaleza. Residuos y emisiones	Proceso	Cantidad SP1 (UF)	Cantidad SP2 (UF)	Cantidad SP3 (UF)	Unidad	Elemento Usado/Descripción
Cenizas residuales	Cocción	0.094	0.705	0.083	kg	ash, from combustión of straw, recycled content cut-off/ Cutoff, S- GLO
Vinazas	Fermentación	0.315	1.111	0.333	lt	Vinasses from agave (mezcal production),

						filtration to soil
Cenizas residuales	Destilación	0.284	0.176	0.033	kg	ash, from combustión of straw, recycled content cut-off/ Cutoff, S- GLO
Bagazo residual	Fermentación	0.945	0.494	0.7	kg	Bagasse degradation in field (wet), IPCC

Fase de Uso de ciclo de vida

En esta fase no se consideraron entradas de materia o insumos debido a que su consumo/uso del producto no representa alguna entrada, únicamente se tomaron en cuenta las salidas de esta fase consideradas como aquellos residuos propios de la botella de mezcal una vez vacía (Tabla 14).

Tabla 14. Inventario de Ciclo de Vida de la fase de Uso por la producción de 1 botella de mezcal joven de 0.750 lt.

Salidas conocidas a la tecnosfera y naturaleza. Residuos y emisiones	Proceso	Cantidad SP1 (UF)	Cantidad SP2 (UF)	Cantidad SP3 (UF)	Unidad	Elemento Usado/Proveedor
Botellas vacías de vidrio	Uso	0.40	0.356	0.40	kg	Waste glass, treatment of waste glass, sanitary landfill {GLO}

Fase de Tran sporte	Etiquetas de PVC (residuo)	Uso	0.004	0.004	0.004	kg	Residues, MSWI, Waste sealing sheet, polyvinyl chloride, residual material landfill {GLO}
	Corchos (residuo)	Uso	0.007	0.006	0.007	kg	Waste polyethylene, high density, packaging, for recycling, unsorted {GLO}
	Cajas de cartón	Uso	0.016	0.014	0.016	kg	treatment OF residues, MSWI- WWT,SLF, waste paperboard, residual material landfill/Cutoff, U-GLO

En esta etapa se consideró el transporte de materias primas a la vinata y el transporte del producto final al centro de distribución/venta en caso de serlo.

Se consideró la distancia recorrida, el vehículo empleado y la carga transportada para el cálculo del impacto asociado con el flujo seleccionado, la unidad de medida se describe en ton*km, referidas a la cantidad de carga transportada por la distancia recorrida (tabla 15).

La mayoría del transporte empleado en los tres escenarios se llevó a cabo con un vehículo en común, una camioneta de carga particular de 3 Ton aproximadamente por lo que se seleccionó este mismo flujo para la mayoría de los transportes, identificados como “transport freight light” en el software.

En la figura 27 se muestra cómo se lleva a cabo el transporte de las piñas de agave de la zona de cosecha al palenque.



Figura 27. Transporte de cabezas de agave.

Tabla 15. Inventario de Ciclo de Vida de la etapa de Transporte por la producción de 1 botella de mezcal joven de 0.750 lt.

Entradas conocidas a la tecnosfera y naturaleza. Residuos y emisiones	Proceso	Cantidad SP1 (UF)	Cantidad SP2 (UF)	Cantidad SP3 (UF)	Unidad	Elemento Usado/Descripción
Transporte de Leña a palenque	Transporte de Materias primas	6*52	4*10	3.15*275	T*km	Transport, freight, light commercial vehicle, diesel, unregulated {ZA}
Transporte de botellas de vidrio, tapas, etiquetas)	Transporte de Materias primas	0.50*32	0.12*42	0.488*48	T*km	Transport, freight, light commercial vehicle, diesel, unregulated {ZA}
Transporte de piñas de agave a palenque	Transporte de Materias primas	12*48	3*80	8*20	T*km	Transport, freight, light commercial vehicle, diesel, unregulated {ZA}
Transporte de agua en camioneta a vivero	Transporte de materias primas		0.03*10		T*km	Transport, freight, light commercial vehicle, diesel, unregulated {ZA}
Transporte de bolsas plásticas a palenque	Transporte de materias primas		0.02*66		T*km	Transport, freight, light commercial vehicle, diesel, unregulated {ZA}
Transporte de tierra/abono	Transporte de materias primas		0.45*10			Transport, freight, light commercial vehicle, diesel, unregulated {ZA}
Transporte a Centro de Distribución	Transporte a centro de distribución	0.73*32	0.846*71	n/a	T*km	transport, freight, light commercial vehicle, average/ Cutoff, U-RoW

Fase de Uso

Esta etapa se caracteriza por el consumo de la unidad funcional (1 botella de vidrio de mezcal joven de 750 ml) por parte del consumidor. Se identificó que en esta fase no existen insumos o entradas de materia o energía por lo que no se incluyó nada, únicamente se tomaron en cuenta como salidas los residuos propios de la botella vacía, como el vidrio y plástico, mismos que se incluyeron en el programa para el cálculo de su impacto.

3.2.2. Balance de Materia

Como requisito para validar los datos presentados en los inventarios de ACV según la ISO 14067, se realizó el balance de materia de cada sistema productivo.

En las figuras 28, 29 y 30, se muestran cada uno de los balances donde entre más gruesa sea la flecha, mayor es la contribución en masa de ese insumo/etapa del ciclo de vida de la botella de mezcal, se muestran también las salidas en rojo del sistema como pueden ser residuos o gases emitidos a la atmósfera.

BALANCE DE MATERIA SISTEMA PRODUCTIVO 1 (MICHOACÁN)

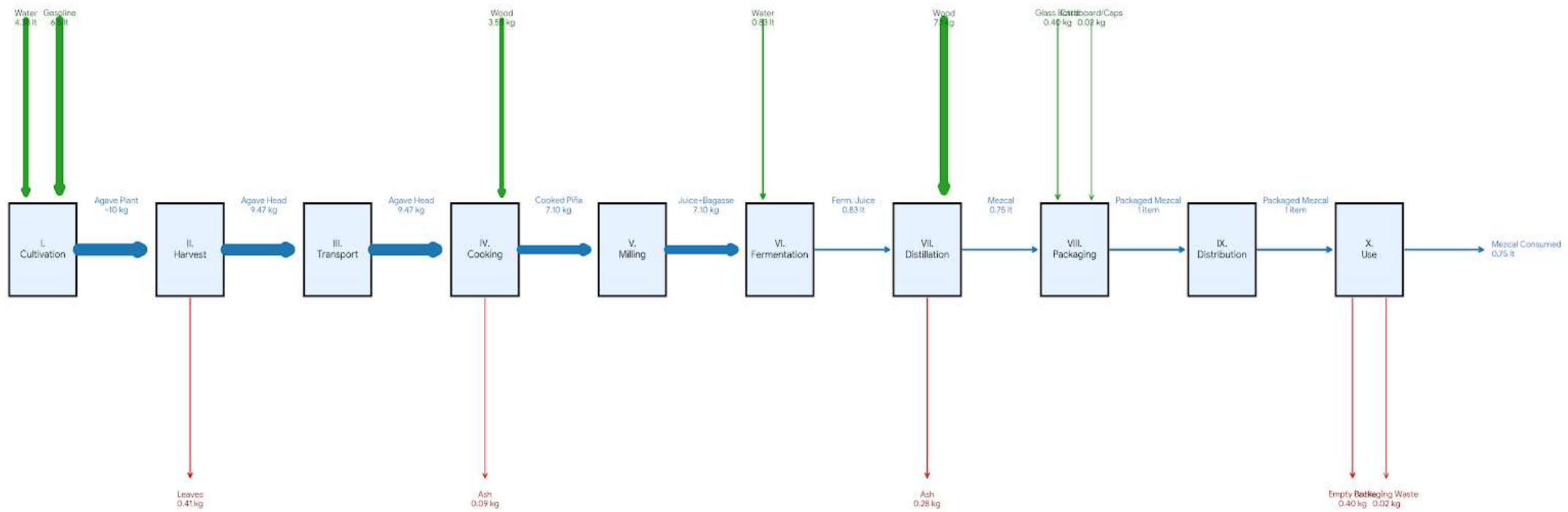


Figura 28. Balance de materia SP-1 (Mich).

BALANCE DE MATERIA SISTEMA PRODUCTIVO 2 (PUEBLA)

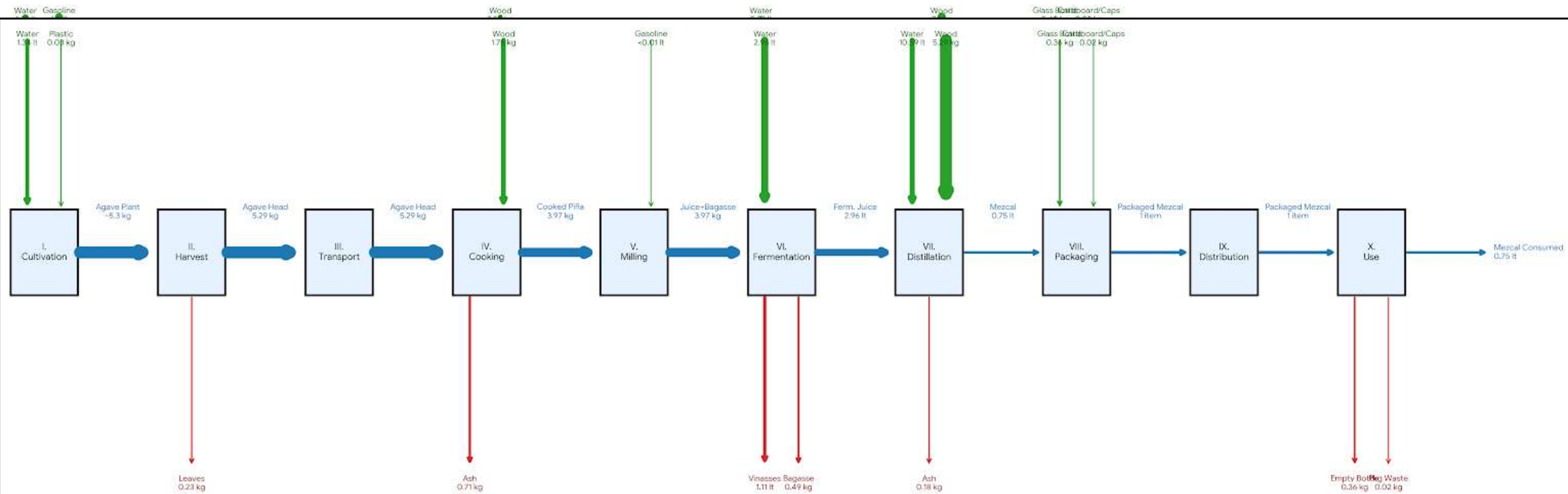


Figura 29. Balance de materia SP-2 (Pue).

BALANCE DE MATERIA SISTEMA PRODUCTIVO 3 (OAXACA)

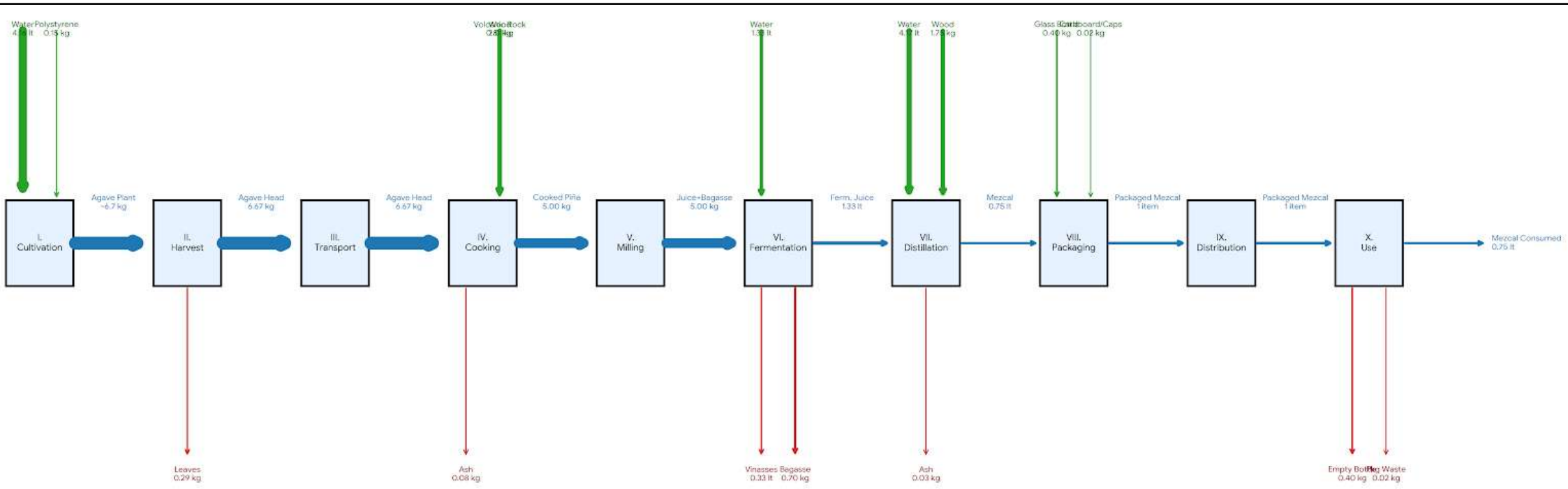


Figura 30. Balance de materia SP-3 (Oax).

3.3. FASE III. EVALUACIÓN DE IMPACTO

En esta fase se van a presentar los resultados del Análisis de Ciclo de Vida enfocados en la estimación de la huella de carbono de producto (HCP). Esta fase se subdivide primero en presentar de manera comparativa la huella de carbono para los tres sistemas estudiados y posteriormente los resultados particulares de cada sistema mezcalero: contribuciones porcentuales por etapa y por proceso, además de la contribución de los principales gases de efecto invernadero que favorecen al impacto en la categoría de Cambio Climático.

3.3.1. Huella de Carbono de producto de los sistemas estudiados

En primer lugar, se presentará la evaluación del impacto ambiental en la categoría de Cambio Climático (GWP100) para los tres escenarios de producción de mezcal analizados: Michoacán (SP-1), Puebla (SP-2) y Oaxaca (SP-3). Los resultados, medidos en kilogramos de CO₂ equivalente (kg CO₂eq), se presentan en el Gráfico 3.

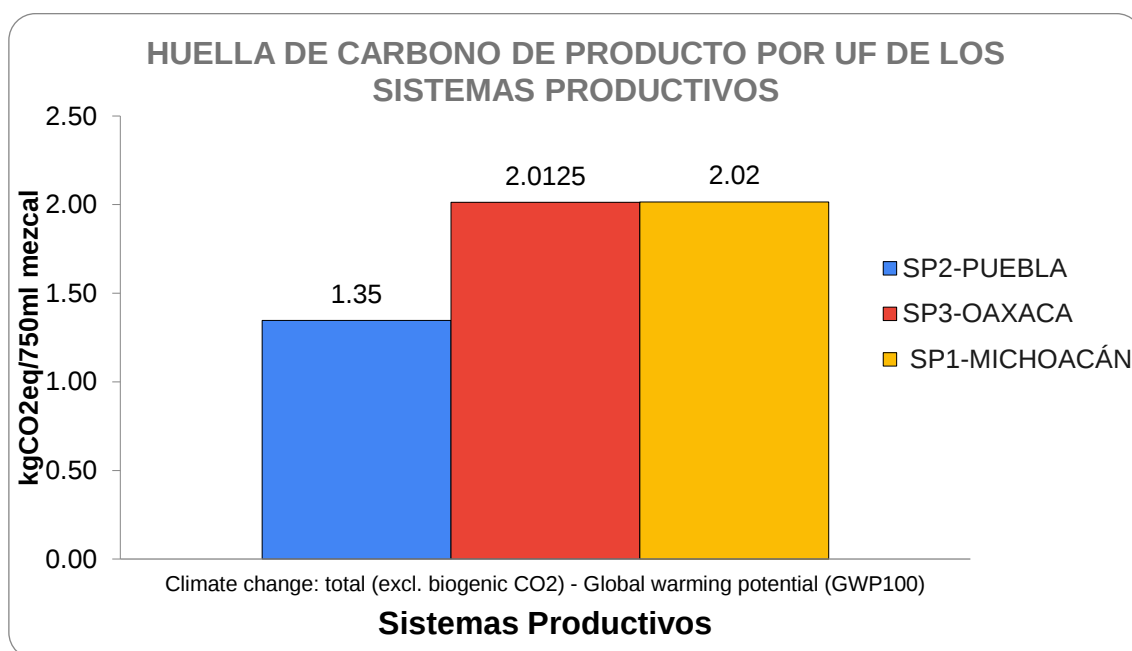


Gráfico 3. Huella de carbono de producto por UF de los sistemas productivos estudiados.

El análisis comparativo de los tres sistemas productivos muestra un comportamiento muy similar en cuanto a su huella de carbono en dos de los sistemas (SP-1 Y SP-3) y una diferencia porcentual de 33% entre el valor más alto (SP-1: 2.015) y el más bajo (SP-2: 1.345).

El sistema productivo de Michoacán (SP-1) registra el valor más alto de Potencial de Calentamiento Global (2.016 kg CO₂eq), seguido casi idénticamente por el sistema de Oaxaca (SP-3) (2.013 kg CO₂eq). La similitud entre ambos se centra principalmente en las cantidades utilizadas y presentadas en el inventario de las principales etapas que más contribución tienen en la huella, como se verá enseguida en el gráfico 4 y 10.

El sistema productivo de Puebla (SP-2) destaca significativamente por presentar el menor impacto ambiental, con un valor de 1.346 kg CO₂eq. Existe una reducción considerable del impacto en el caso de Puebla. En términos porcentuales, el ciclo de vida de la botella de mezcal en Puebla es aproximadamente un 33.2% menos impactante en términos de emisiones de GEI en comparación con el proceso de Michoacán, esto se debe al impacto que tuvo tanto el combustible empleado (gasolina), como la producción por el uso del insumo agrícola (cal) en la etapa de cultivo del SP-1 de Michoacán, mientras que en el SP-2 de Puebla no se emplearon este tipo de combustibles e insumos para esta etapa en específico, la cual es una de las que demanda mayor energía.

3.3.2. Huella de Carbono de producto e impacto asociado de cada sistema productivo

A continuación, se presentan los resultados asociados a cada sistema productivo. Se muestran para cada uno su respectivo gráfico sobre la contribución porcentual por etapa de ciclo de vida, por proceso y por tipo de gas contaminante.

3.3.2.1. Sistema Productivo 1 (Tumbisca, Mich.)

3.3.2.1.1. Contribución a la HCP por etapa SP1

Para el SP-1 (Mich.) se observa una distribución de impactos influenciada mayoritariamente por la etapa de cultivo y el empaquetado (Gráfico 4). La gráfica 4 y 5 se relacionan entre sí, en el gráfico 4 se muestra la contribución por etapa y en el gráfico 5 se muestra más específicamente cual fue el proceso que mayor impacto tuvo.

La etapa de cultivo representa el mayor impacto, contribuyendo con un 31% al total de la HCP, esto se debe específicamente al impacto que tiene el uso de combustible en la etapa de cultivo y de molienda (gráfico 5). Le siguen el empaquetado (25%), sobresaliendo la producción de vidrio como el mayor proceso contribuyente dentro de esta etapa. El transporte de materia prima tiene una contribución también importante (22%) debido a las distancias y medios de transporte empleados para realizar esta etapa. Las etapas de producción en palenque, como la destilación (7%) y la fermentación (5%), muestran una relevancia menor en comparación con la obtención de insumos y la materia prima.

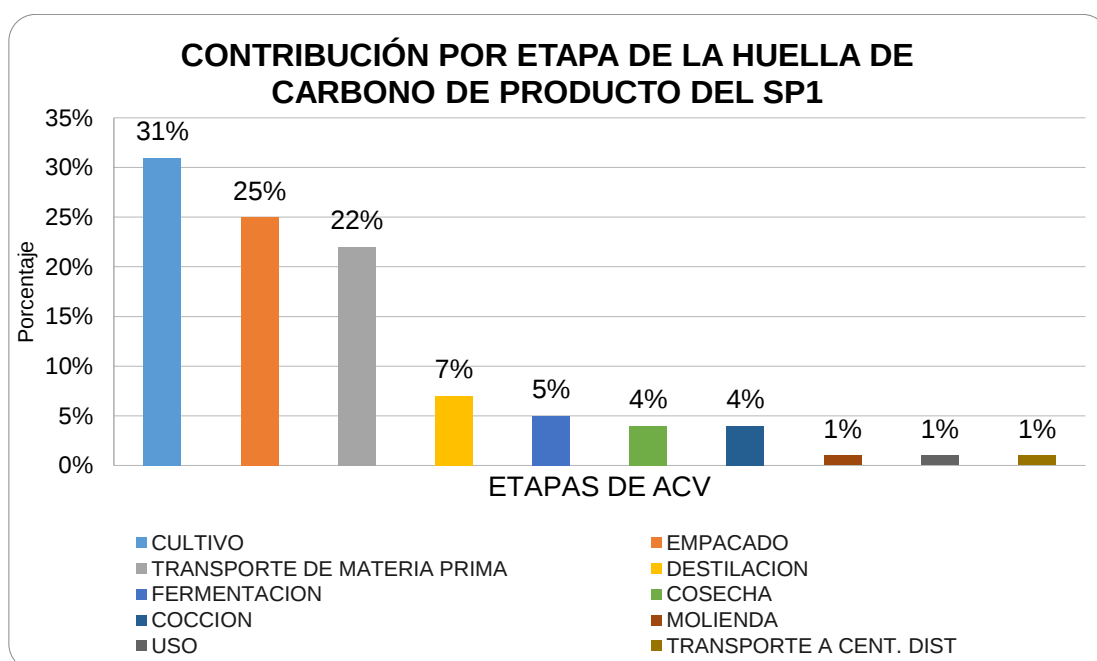


Gráfico 4. Contribución por etapa de la huella de carbono de producto del SP-1.

3.3.2.1.2. Contribución porcentual a la HCP por proceso SP1.

Al evaluar por procesos específicos, el consumo de combustible (gasolina) en maquinaria agrícola es el factor individual más impactante (30%), para este proceso cabe resaltar que se empleó combustible para las bombas de agua y su extracción para riego del cultivo, así como para la etapa de molienda en la ensiladora de agave. El segundo proceso a destacar fue la producción de vidrio para botellas (22%) y el transporte de materia prima (22%). Esto corrobora que la mecanización del campo y la producción para el envase son los principales puntos rojos de las emisiones en este sistema.

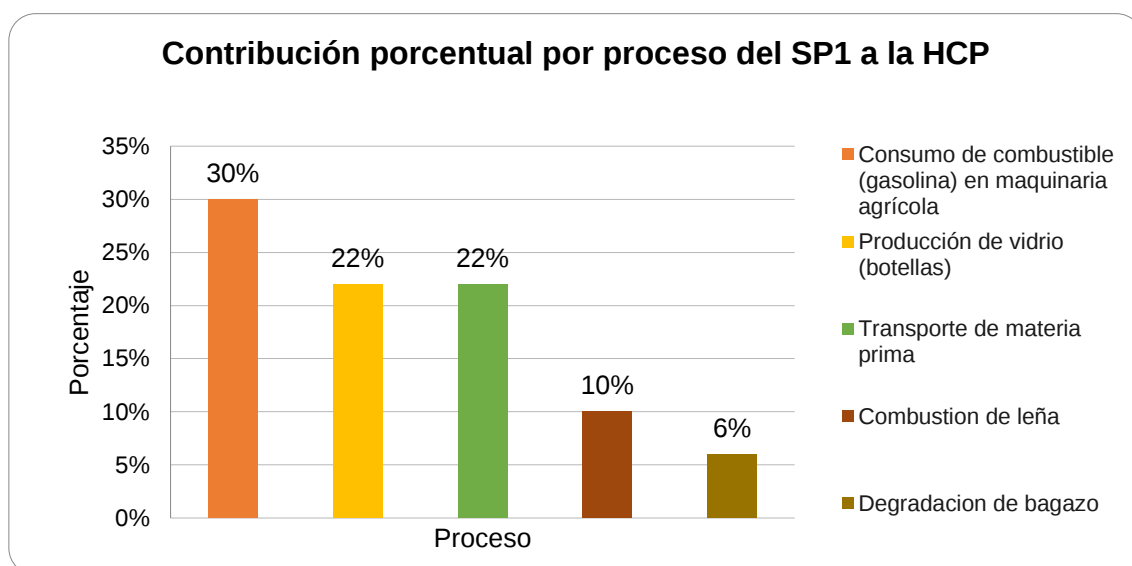


Gráfico 5. Contribución porcentual por proceso del SP-1 a la HCP.

3.3.2.1.3. Contribución a la HCP por gas contaminante SP1.

En términos de gases de efecto invernadero, el CO₂ de origen fósil es el contaminante predominante, con una emisión de 1.44 kg CO₂eq. Se identificaron también aportes importantes de Metano no fósil (CH₄) (0.21 kg CO₂eq) y Metano fósil (CH₄) (0.15 kg CO₂eq) (Gráfico 6).

La diferencia entre los distintos compuestos del gas metano presentados en el gráfico 6 radican principalmente en que el metano fósil (identificado como el color café en el gráfico) está referido a los procesos industriales, en este caso se ve reflejado en la combustión incompleta de combustibles fósiles. Por otro lado, el metano no fósil aquí referido (color amarillo en el gráfico) hace mención al metano biogénico producido principalmente por procesos biológicos, que en este caso de estudio está ligado a los procesos de fermentación natural y la disposición de vinazas. Mientras que el metano contenido en suelo o biomasa también representado en el gráfico 6 (color naranja en el gráfico), hace referencia también a un gas biogénico de procesos biológicos, que en este caso están ligados al proceso de descomposición de residuos agrícolas dejados en el suelo (hojas de penca de agave residual y bagazo).

Esto sugiere que, en el SP1, las emisiones derivadas de procesos biológicos, específicamente provenientes de la fermentación y la disposición de las vinazas tienen un peso mayor que la combustión incompleta de combustibles fósiles (gasolina).

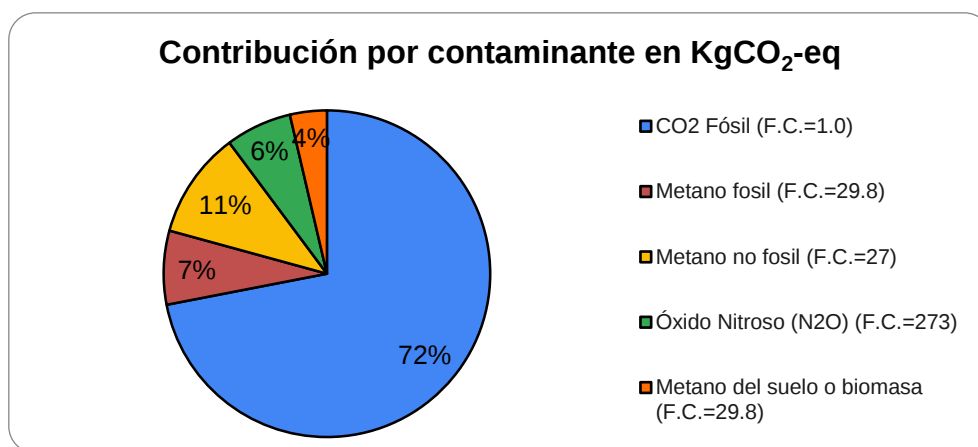


Gráfico 6. Contribución por contaminante en KgCO₂-eq.

3.3.2.2. Sistema Productivo 2 (San Luis Atolotitlan, Pue.)

3.3.2.2.1. Contribución a la HCP por etapa SP-2

A diferencia del SP-1, en este sistema la etapa de empackado se posiciona como el mayor contribuyente de la huella de carbono (33%), a diferencia del sistema anterior, la etapa de cultivo no tiene una contribución relevante debido a que en este sistema (SP-2) no se emplearon insumos como combustibles o aditamentos agrícolas los cuales contribuyen considerablemente en el total de la huella. Le sigue la etapa de transporte de materia prima con el 24% del total y el transporte a centro de distribución (17%), dichas etapas de transporte tienen en este caso un aporte relevante en la huella debido a que las distancias que existen entre el palenque y la adquisición de insumos y puntos de venta son muy retiradas.

Las demás etapas contribuyen con menos del 10% del total de la HCP (Gráfico 7).

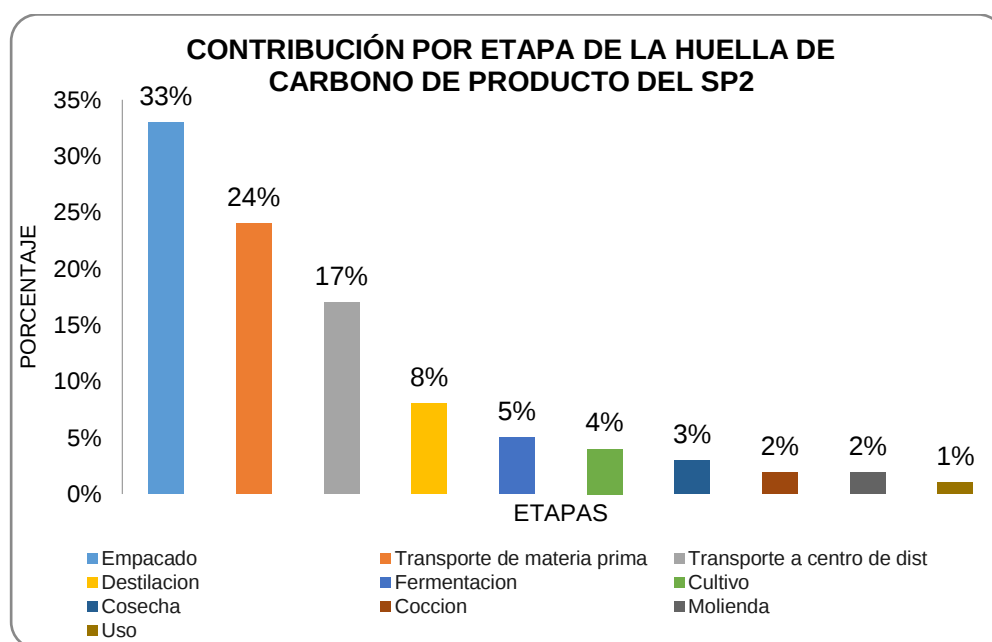


Gráfico 7. Contribución por etapa de la huella de carbono de producto del SP-2

3.3.2.2.2. Contribución porcentual a la HCP por proceso SP2.

En el gráfico 8, se muestra la contribución por actividad/proceso del SP-2, resaltando el proceso de la producción de vidrio para la fabricación de la botella de empaque, el cual tiene una contribución de 29% del total de la huella, seguido de ambos transportes tanto de materia prima como al centro de distribución y venta.

Este resultado confirma que la fabricación de la botella de vidrio requiere de una gran cantidad de energía para su elaboración y por ende su impacto tan alto respecto a los demás procesos descritos en este trabajo. Además, la etapa de transportes para este caso genera un impacto considerable al total de la huella, ya que se recorren distancias muy largas para la obtención de los recursos y la distribución del producto final en contraste con el escenario previo.

El proceso de la combustión de leña representa el 10% del total, actividad que se sabe genera una combustión incompleta debido a la falta de oxígeno suficiente, el diseño de los hornos de destilación y pozos de cocción, la cantidad y disposición de la materia a calentar, así como de la larga duración de combustión.

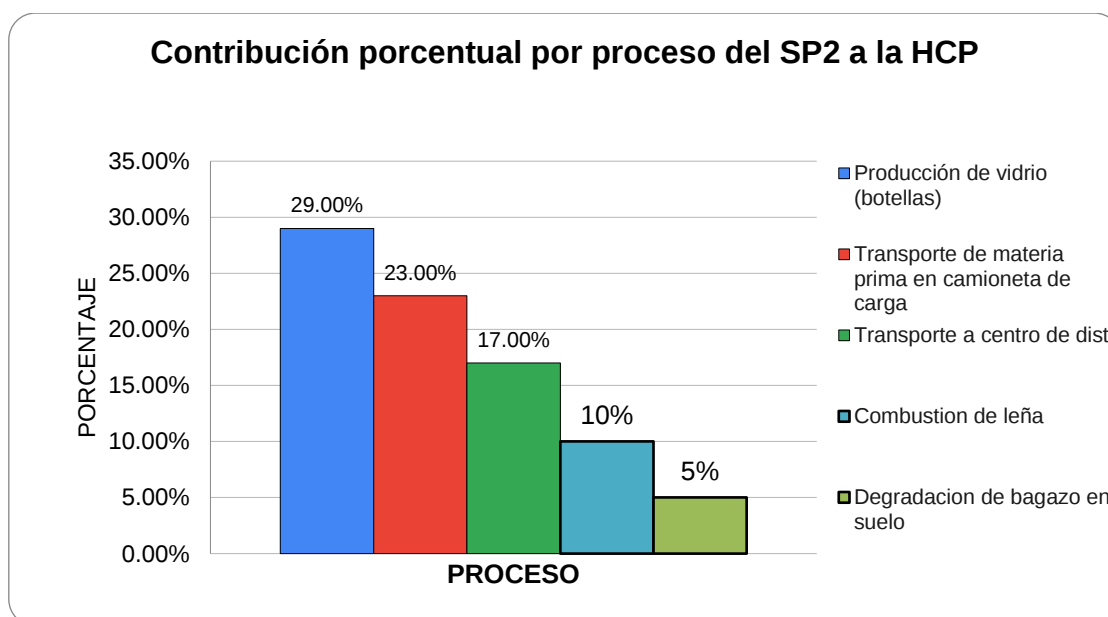


Gráfico 8. Contribución porcentual por proceso del SP-2 a la HCP.

3.3.2.2.3. Contribución a la HCP por gas contaminante SP2.

El perfil de contaminantes se mantiene consistente con el SP-1, siendo el CO₂ fósil el gas mayoritario (0.99 kg CO₂eq) producido principalmente por la quema de combustibles fósiles y la combustión incompleta de la biomasa. Le sigue en mayor medida el metano no fósil (0.42 kg CO₂eq) y el metano fósil (0.25 kg CO₂eq) (Gráfico 9).

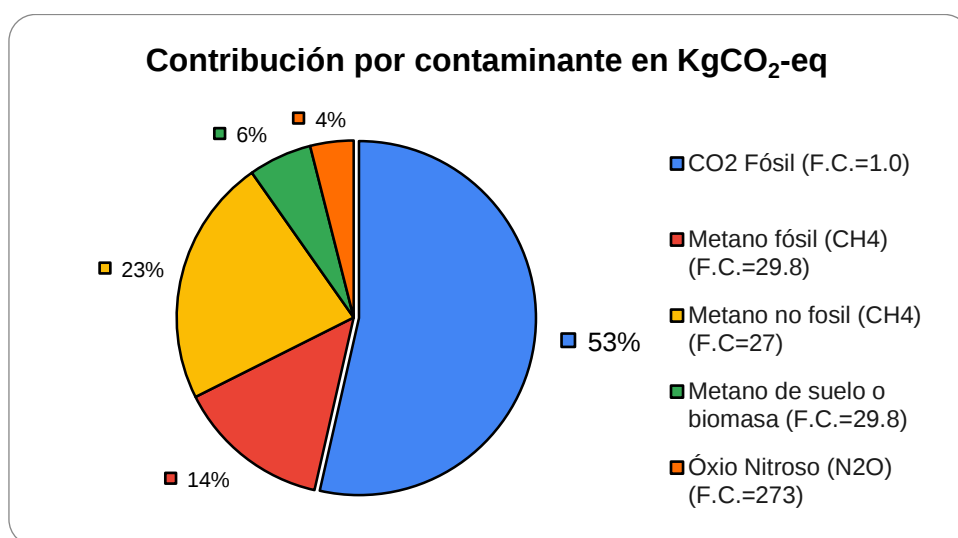


Gráfico 9. Contribución por contaminante en KgCO₂-eq.

3.3.2.3. Sistema Productivo 3 (Santiago Matatlán, Tlacolula, Oax.)

3.3.2.3.1. Contribución a la HCP por etapa SP-3.

En el gráfico 10 se presenta la contribución por etapa del SP-3, dando como resultado que la etapa agrícola de cultivo/vivero es la que más impacto tiene con un 38% del total de la HCP, esto se debe a que en este sistema se empleó una gran cantidad de polímeros agrícolas, específicamente los almácigos de unisel necesarios para el cultivo de las plántulas por lo que su fabricación emitió cantidades considerables de GEI.

En segundo lugar, se ubica la etapa del transporte de materias primas al palenque con un 27% del total, resaltando de esta manera que las largas

distancias sumado a la gran cantidad de insumos y la eficiencia del vehículo empleado tienen un impacto considerable al ambiente.

En tercer lugar y con un alto porcentaje de impacto lo ocupa la etapa de empaçado (25%) que como ya hemos visto en los sistemas 1 y 2 tiene siempre una influencia muy alta por las grandes cantidades de energía empleadas en el proceso de fabricación de estos insumos.

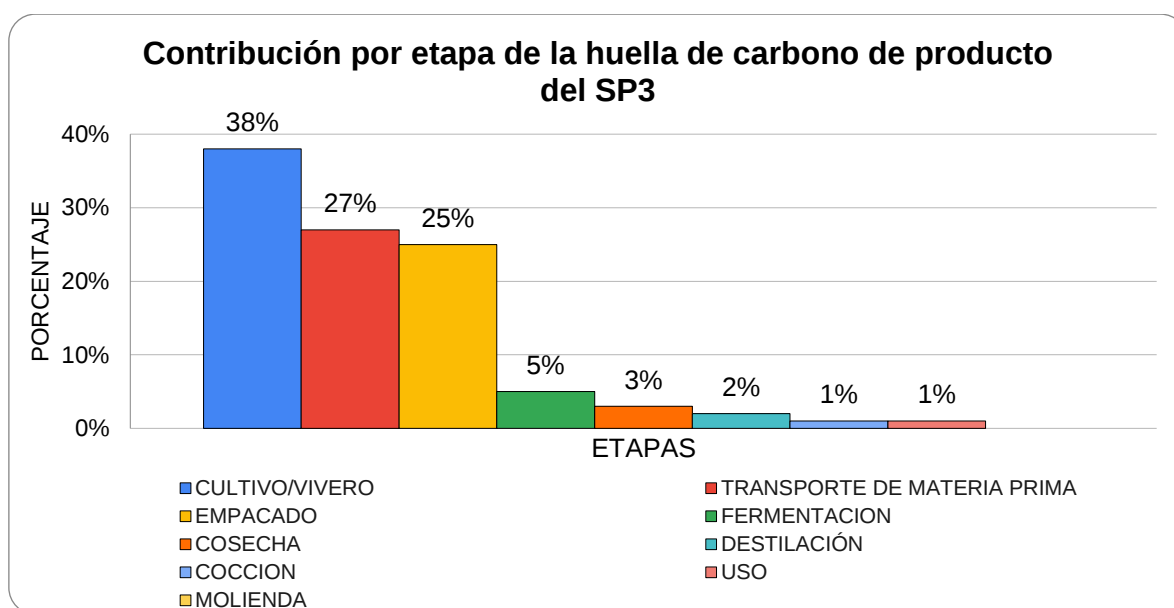


Gráfico 10. Contribución por etapa de la huella de carbono de producto del SP-3.

3.3.2.3.2. Contribución porcentual a la HCP por proceso SP-3.

Para este caso, dos procesos comparten el mismo valor de impacto a la huella de carbono (Gráfico 11), la producción de poliestireno para los almácigos agrícolas y el transporte de materia prima al palenque con el 27%, los insumos que son transportados al palenque son tanto las piñas de agave una vez jimadas, como los envases de vidrio, las tapas y las etiquetas necesarias todo ello se transporta en una camioneta de carga de 3 TON aproximadamente y prácticamente esto se replica en los tres sistemas productivos.

En tercer lugar y con un peso también considerable, el proceso de empaçado al igual que los sistemas anteriores, figura dentro de los tres principales procesos que más aporte tienen a la huella de carbono por la producción de vidrio, el

cual produce una alta carga de emisiones a la atmósfera por la gran cantidad de insumos necesarios para su procesamiento y fundición (gas natural, agua, diésel, electricidad, etc.)

Enseguida se encuentra la inyección por moldeo con el 11%, el cual es un proceso necesario que se realiza para cualquier producción de un polímero.

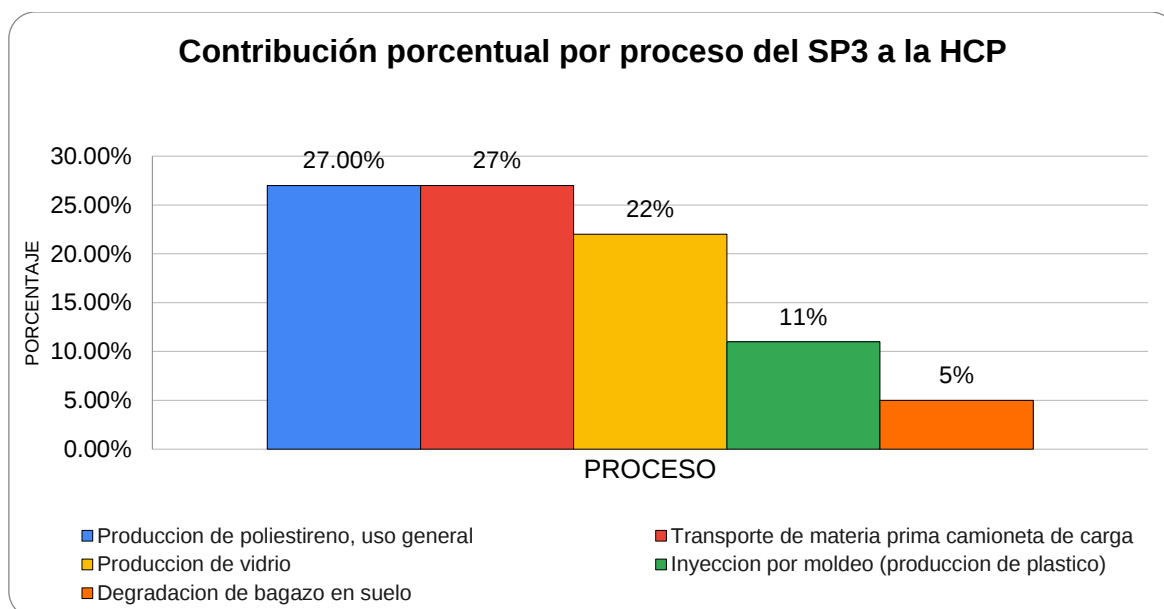


Gráfico 11. Contribución porcentual por proceso del SP-3 a la HCP.

3.3.2.3.3. Contribución a la HCP por gas contaminante SP-3

El CO₂ fósil continúa siendo el gas de mayor impacto con 1.55 kg CO₂eq, seguido del metano fósil con el 12% cuya contribución se apega a los procesos de combustiones incompletas de hidrocarburos (Gráfico 12).

El gas de óxido nitroso sobresale en este gráfico con un 5% de la contribución total, este gas tiene el potencial de impacto al cambio climático de 273 veces más alto que el CO₂. El origen en este estudio de este gas de efecto invernadero es principalmente por la actividad microbiana del suelo, dado que estamos considerando el proceso de degradación de hojas o residuos agrícolas como las pencas de agave o del bagazo, este gas se genera a través de la nitrificación y desnitrificación cuando estos residuos se dejan en el campo para degradarse, liberan nitrógeno al suelo y las bacterias del suelo convierten este

nitrógeno en N_2O bajo ciertas condiciones de humedad y oxigenación (Taboada et al., 2018).

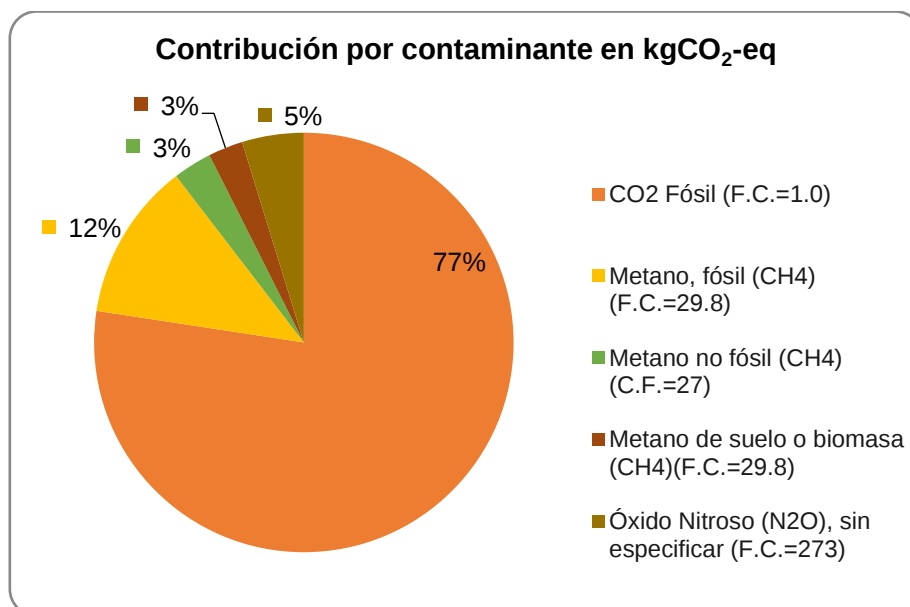


Gráfico 12. Contribución por contaminante en $\text{kgCO}_2\text{-eq}$.

3.3.3. Comparativo por etapas de ciclo de vida entre SPs

3.3.3.1. Etapa de cultivo/vivero

En el gráfico 13, se muestra la comparativa de la contribución porcentual a la huella de carbono de producto entre los tres sistemas estudiados de la etapa de cultivo/vivero, donde el SP-1 y el SP-3 comparten similar impacto en la etapa de cultivo/vivero con poco más del 30% del total, esto se debe al impacto que tiene la producción de polímeros agrícolas como el unigel en el caso del SP-3 y al uso de combustibles fósiles en el SP-1 para el funcionamiento de la bomba hidráulica necesaria para la extracción de agua de río. Por otro lado, el SP-2 de Puebla tiene el menor impacto con tan solo el 4%, por emplear técnicas más orgánicas como lo es, las camas de cultivo en tierra para el cultivo de las plántulas de agave, las cuales una vez crecidas utilizan bolsas agrícolas de poliestireno para su trasplante, el cual su proceso de fabricación

tiene un impacto menor que polímeros como el unigel y no utilizan bombas para la extracción de agua, pues es obtenida mediante manguera directa del río.

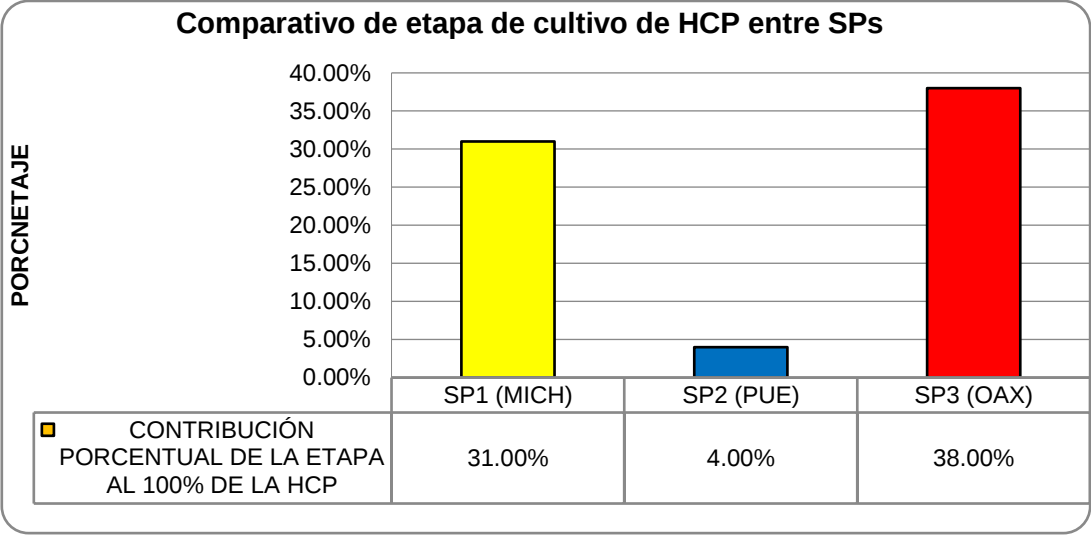


Gráfico 13. Comparativo de etapa de cultivo de HCP entre SPs.

3.3.3.2. Etapa de Transporte de Materias Primas

La etapa de transporte de materias primas juega un papel muy importante para cualquier proceso de producción, pues sin los insumos no sería posible el desarrollo del producto final, por ello en este trabajo la etapa de transporte de materias primas tiene un peso considerable muy similar para los tres casos de estudio de entre el 22% al 27%, esto se debe a que en los tres sistemas emplean vehículos para el transporte muy similares en cuanto a eficiencia y características, además de que las distancias recorridas sobrepasaban en los tres casos los 40 km. (modelos del siglo pasado, 6-8 cilindros, y capacidad de carga de 3 TON aprox.), por lo que se usó el mismo elemento/proveedor en el software *OpenLCA* para el cálculo del impacto en los tres sistemas.

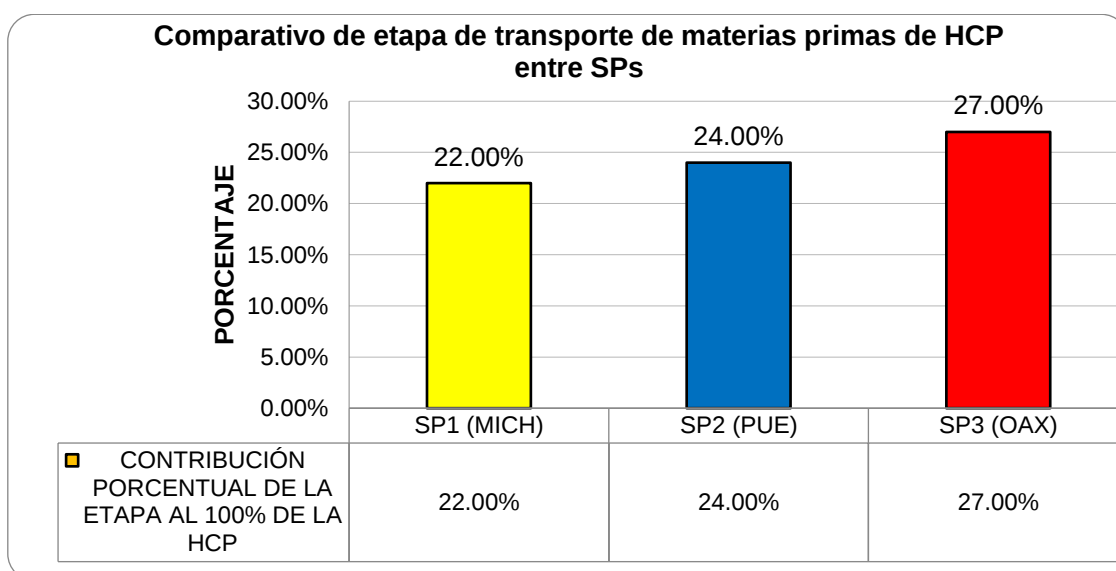


Gráfico 14. Comparativo de etapa de transporte de materias primas de HCP entre SPs.

3.3.3.3. Etapa de cosecha/jima

La etapa de cosecha o jima tiene solo una actividad de impacto en los tres sistemas estudiados, el cual es el proceso de degradación de las hojas o pencas de agave en los suelos, y en todos los sistemas tiene un impacto muy similar con aproximadamente el 4% del total de la HCP, el gas metano biogénico y la formación de N₂O son los principales gases resultantes de esta etapa.

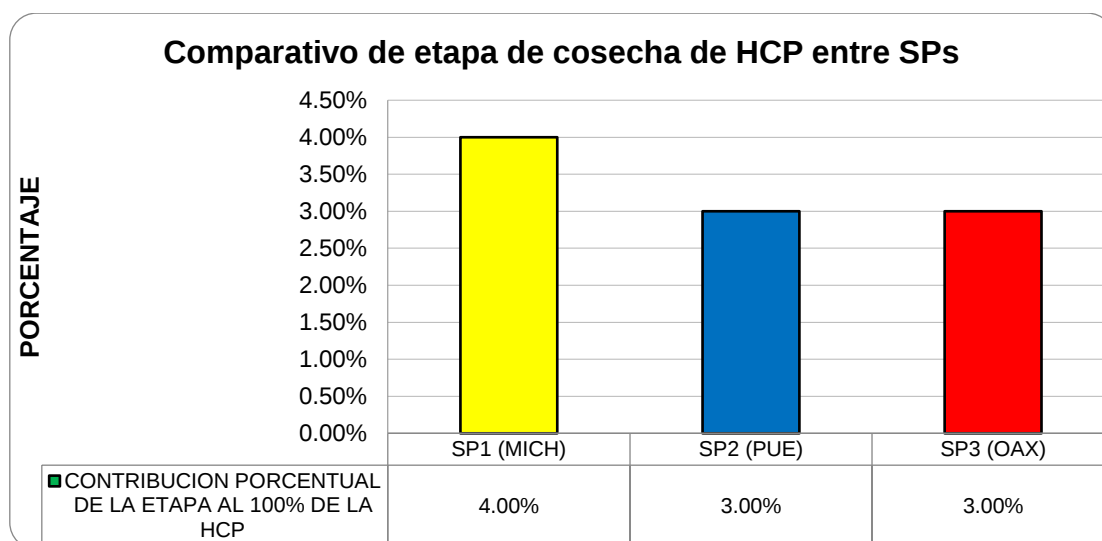


Gráfico 15. Comparativo de etapa de cosecha de HCP entre SPs.

3.3.3.4. Etapa de cocción

El gráfico 16 muestra la contribución de la etapa de cocción de las piñas de agave, a pesar de que en los tres sistemas el impacto es mínimo su impacto, este sobresale un poco más en el caso del palenque mezcalero de Michoacán (SP-1), por utilizar una mayor cantidad de materia prima, en este caso una mayor cantidad de leña que los otros sistemas estudiados.

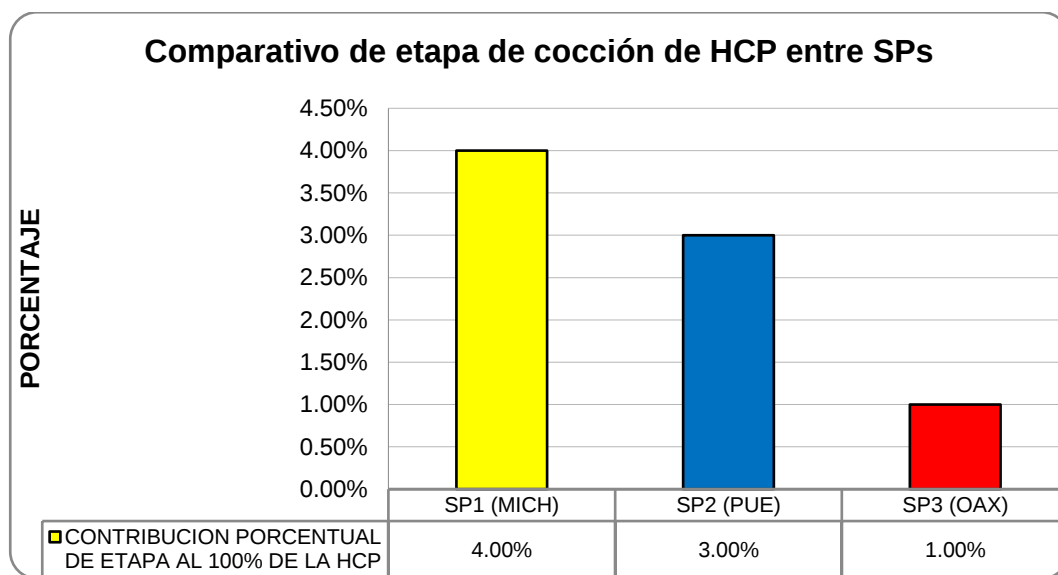


Gráfico 16. Comparativo de etapa de cocción de HCP entre SPs.

3.3.3.5. Etapa de molienda

La etapa de molienda de las cabezas de agave cocidas de la producción de mezcal representa un impacto mínimo en la HCP, tanto en el sistema mezcalero de Michoacán como en el de Puebla se emplea maquinaria especializada para facilitar esta actividad empleando combustibles fósiles, sin embargo, su contribución no es mayor al 2% del total. En el SP-3 de Oaxaca esta etapa se realiza a mano con ayuda únicamente de machetes y/o de tahona chilena por lo que no se toma en cuenta ningún insumo material que influya en la huella.

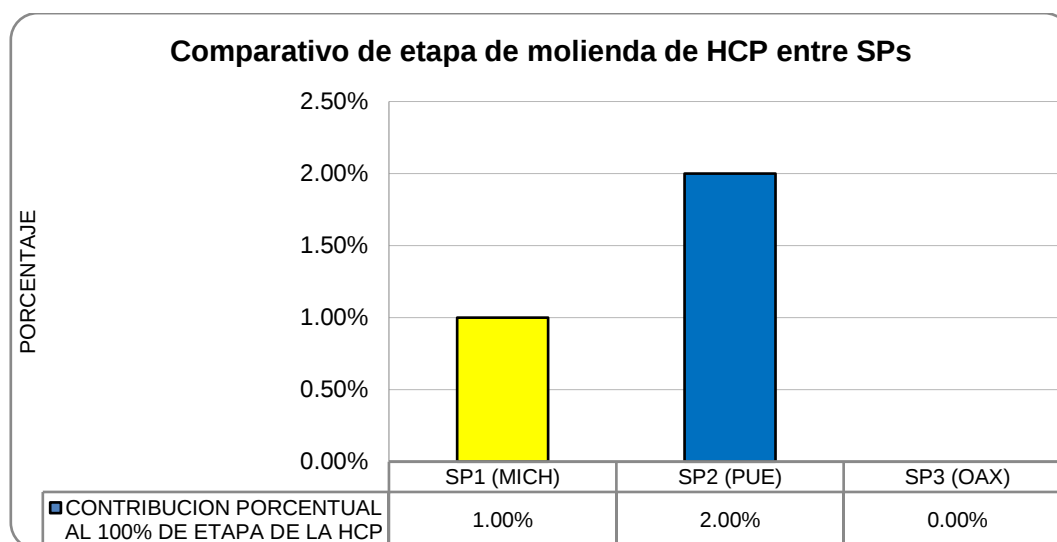


Gráfico 17. Comparativo de etapa de molienda de HCP entre SPs.

3.3.3.6. Etapa de fermentación

El gráfico 18 resalta la contribución de la etapa de fermentación a la HCP, donde el impacto proviene de la descomposición natural del bagazo y las vinazas en suelo para los tres sistemas por igual. El SP-1 de Mich. tiene un aporte de 0.122 kgCO₂eq (6%) resultado de la cantidad de bagazo y vinazas resultantes y considerados en esta etapa, mientras que el sistema productivo 2 y 3 contribuyen de manera similar con el 5% debido a que tienen cantidades muy similares de estos residuos, en cuanto a vinazas el SP-1 tiene una cantidad de 0.315 lt/UF, similar al SP-3 con 0.333 lt/UF, mientras que en residuos de bagazo el SP-1 lidera con 0.945 kg/UF, seguido del SP-3 con 0.7 kg/UF y del SP-2 con 0.494 kg/UF (tabla 13).

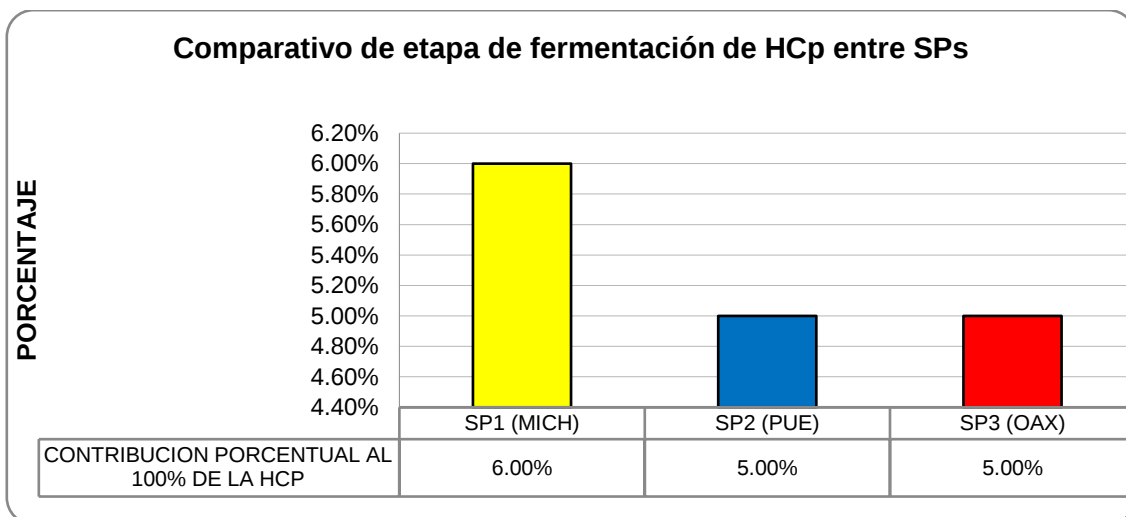


Gráfico 18. Comparativo de etapa de fermentación de HCP entre SPs.

3.3.3.7. Etapa de destilación

La etapa de destilación tiene un impacto en la huella de carbono positivo por la generación de GEI, por la quema de leña necesaria para destilar el producto final, por lo que esta etapa es también de suma importancia para tenerla en cuenta. En este caso, el sistema que más impacto mostró fue por emplear una mayor cantidad de leña, es decir el SP-2 de Puebla con un aporte del 8% seguido por detrás del SP-1 de Michoacán con el 7% (gráfico 19).

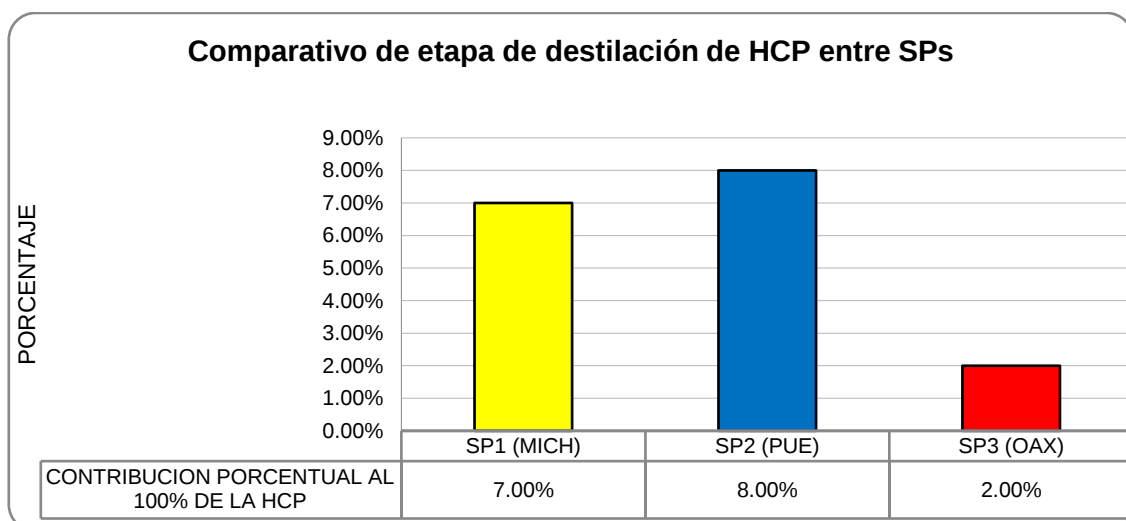


Gráfico 19. Comparativo de etapa de destilación de HCP entre SPs.

3.3.3.8. Etapa de empackado

Esta es una de las etapas que más impacto tuvieron en los tres sistemas productivos con un aporte a la huella de más del 25% al total del sistema lo que quiere decir que es un punto crítico en el ciclo de vida de la botella de mezcal. Su impacto radica en los procesos que se realizan para generar los envases y plásticos necesarios para su envasado.

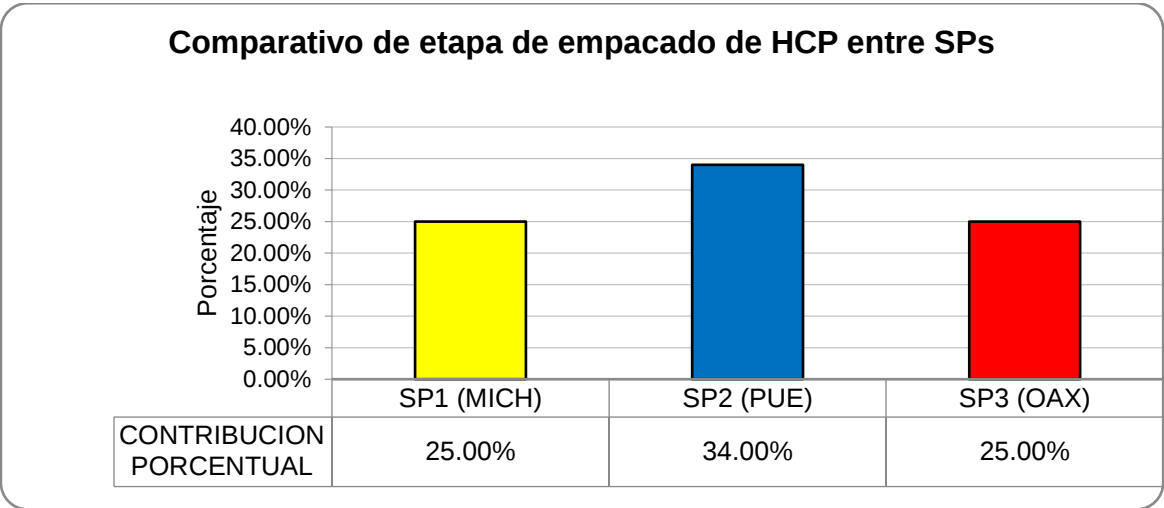


Gráfico 20. Comparativo de etapa de empackado de HCP entre SPs.

Dentro de estos impactos, el mayor aportador se le atribuye a la producción del vidrio, el cual representa poco más del 85% del total del aporte por etapa únicamente de la etapa de empackado, en el gráfico 21, se presenta el ejemplo del SP-1, donde se muestra que la manufactura de las botellas de vidrio representa el 22% del total de la etapa de empackado (25%), y que la producción de las cajas de cartón, el plástico para las tapas y la etiqueta solo contribuyen con 1%. respecto al total de la etapa.

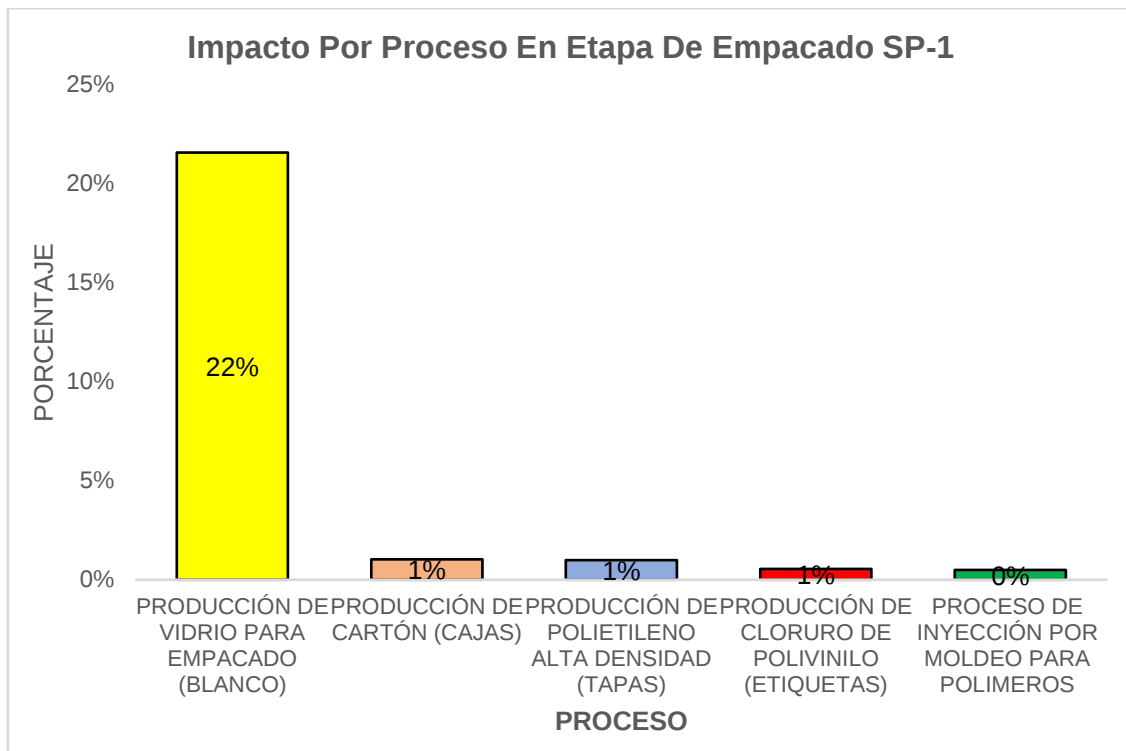


Gráfico 21. Impacto Por Proceso En Etapa De Empacado SP-1.

Debido al gran peso que tiene esta etapa en la HCP para los tres sistemas, se realizó un análisis de sensibilidad para conocer cómo se ve modificada la HCP cuando no se contempla la producción de los insumos para el empaque: producción de vidrio, producción de cartón y producción de plástico. Además, se modeló otra perspectiva para conocer qué es lo que pasa cuando se considera un reúso de la botella de vidrio de hasta 5 veces en su etapa de vida, considerando en esta perspectiva la producción de los insumos de empaque.

A continuación, se presenta la contribución a la huella de carbono de producto sin tomar en cuenta el impacto proveniente de la producción/manufactura de los insumos necesarios para el empaque (vidrio, plástico y cartón), si se está considerando el impacto por el transporte al palenque y todas las demás etapas al igual que en los resultados anteriores (Gráfico 22).

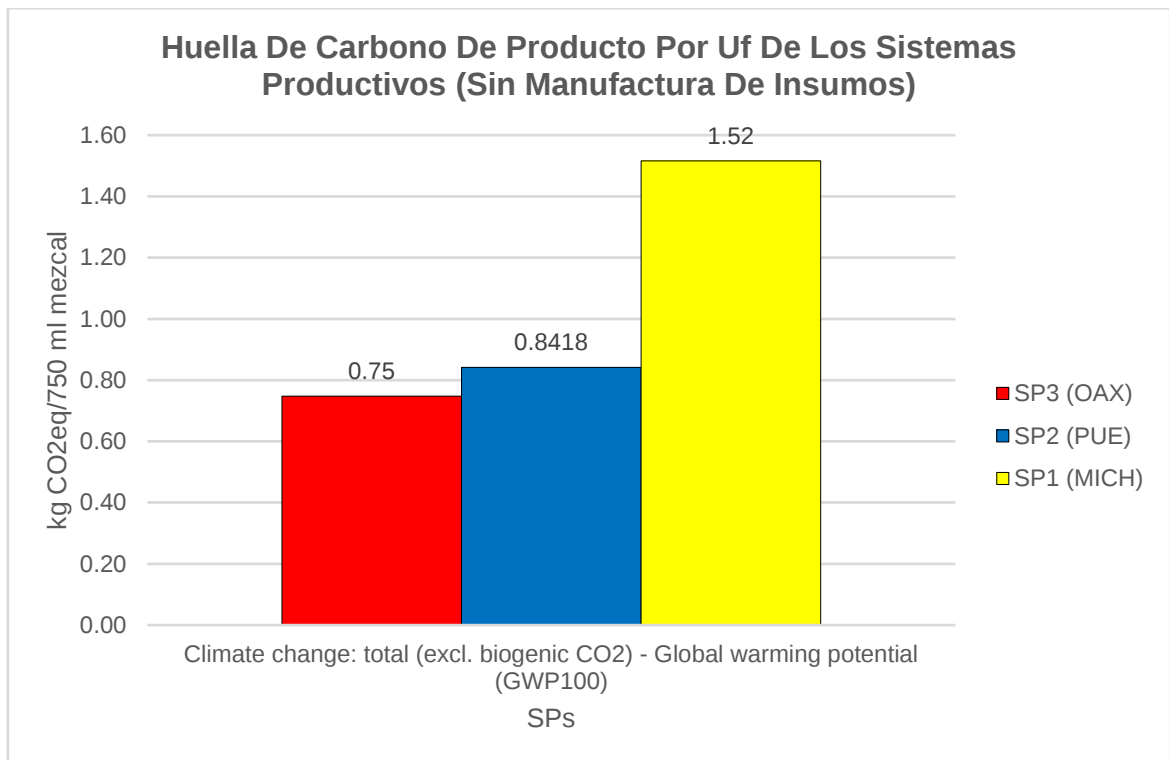


Gráfico 22. Huella de Carbono de Producto de los SPs estudiados sin considerar manufactura de insumos de empaque.

Existe una diferencia muy marcada a comparación con el gráfico 3 (HCP considerando manufactura de insumos), en este caso, el SP-3 (Oax.) es el sistema que menor contribución tiene a la huella, con una reducción del 62% del impacto con solo 0.75 kgCO₂eq/UF. El SP-2 (Pue) tuvo una reducción del 37%, mientras que el SP-1 (Mich.) sigue siendo el sistema que mayor contribución tiene a la huella de carbono reduciendo de esta manera 0.5 kg de CO₂eq/UF al aporte principal.

Ahora se presenta el modelo del impacto que tuvieron los tres sistemas productivos, suponiendo que la botella de vidrio tuvo un reúso de 5 veces en su vida útil, esto debido al gran aporte que tiene su manufactura y por ende la reducción que pudiera demostrar si aplicamos herramientas de la economía circular (Gráfico 23).

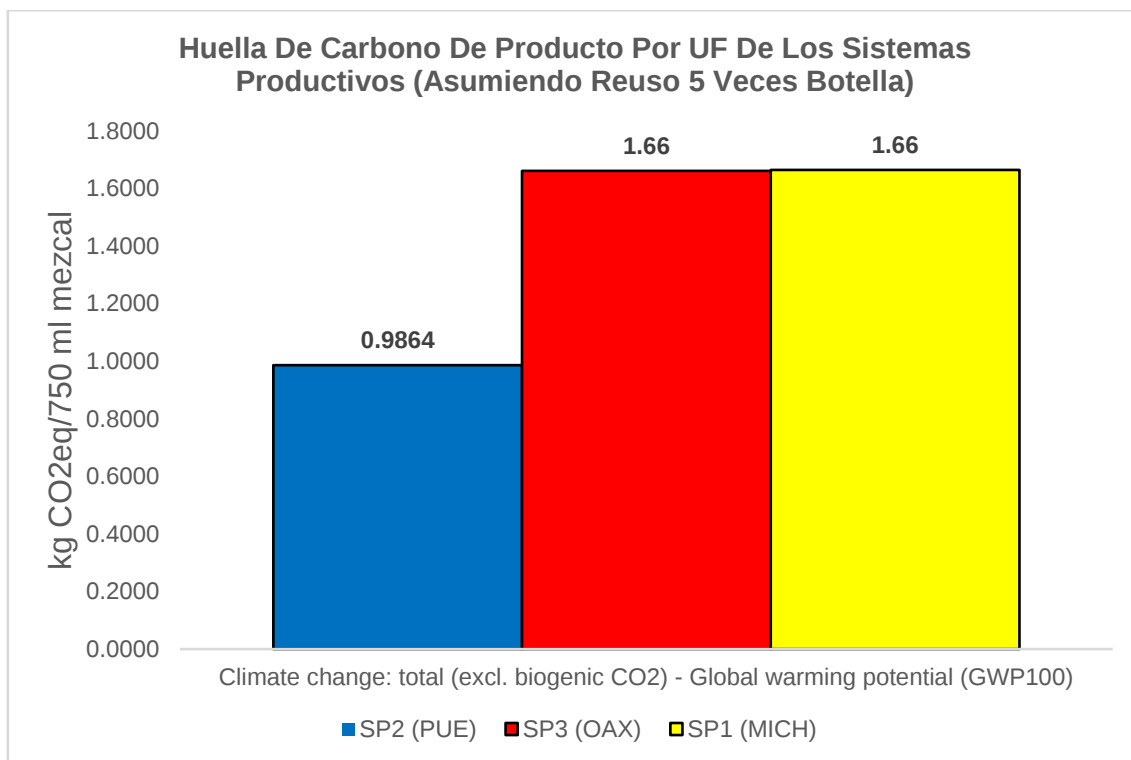


Gráfico 23. Huella De Carbono De Producto Por UF De Los Sistemas Productivos asumiendo un reúso 5 Veces de la botella.

Si consideráramos el reúso de la botella de vidrio, tendríamos una reducción del 27% para el SP-1 y SP-3 (0.35 kgCO₂eq/UF aprox.), mientras que el SP-1 tendría una disminución en la HCP del 17%. Estos resultados confirman que el *HotSpot* principal radica en la producción del vidrio para las botellas, pues se requiere de una gran cantidad de energía para su elaboración, sin embargo, si aplicamos conceptos de la sustentabilidad podríamos reducir considerablemente la huella de carbono de producto en este tipo de sistemas productores de mezcal artesanal.

3.3.3.9. Etapa de transporte a centro de distribución

El resultado que más sobresale en el gráfico 24 es la contribución que tiene la etapa de transporte al centro de distribución/venta en el SP-2 de Puebla con 0.228 kgCO₂eq (17% del total), esto se debe a las largas distancias que existen entre el palenque mezcalero a la ciudad donde se distribuye y también

donde se consiguen los insumos. Mientras que el SP-1 tiene una contribución mínima con sólo el 1% del total debido a que la mitad de la venta se realiza de manera local y la otra mitad se envía a distribución a la ciudad más cercana. Por otro lado, el SP-3 al tener solo venta local no se consideró un impacto directo para esta etapa.

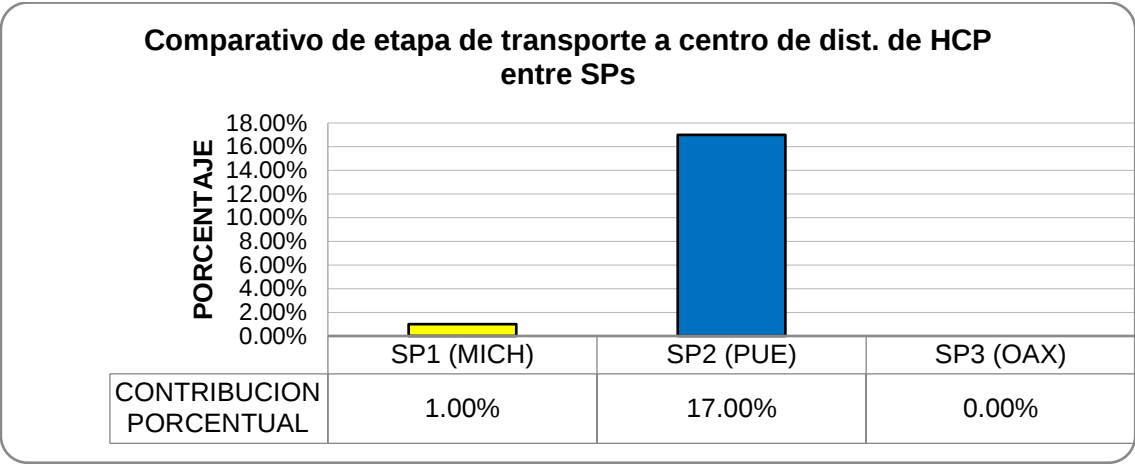


Gráfico 24. Comparativo de etapa de transporte a centro de dist. de HCP entre SPs.

3.3.3.10. Etapa de uso

En esta etapa se consideraron los impactos de todos los residuos resultantes de la botella de mezcal una vez consumida por el usuario como lo es el vidrio, el plástico y el cartón contenidos en la botella y su empaque. Se consideró que este tipo de residuos de los tres sistemas tenían como destino final el relleno sanitario municipal y que cada residuo se le daba un manejo especial. Los tres sistemas reflejaron un patrón de impacto similar con el 1% del total de la huella de carbono (gráfico 25).

Es importante resaltar que, en este trabajo, los residuos no se presentaron como una etapa independiente dentro del sistema, si no que se consideraron como salidas de materia en las etapas correspondientes, en el caso de los residuos industriales de manufactura como lo fue el bagazo y las vinazas estos se consideraron en la etapa de fermentación, y los residuos correspondientes al empackado del producto se consideraron en esta etapa de uso, pues son los que se desechan una vez consumido el producto.

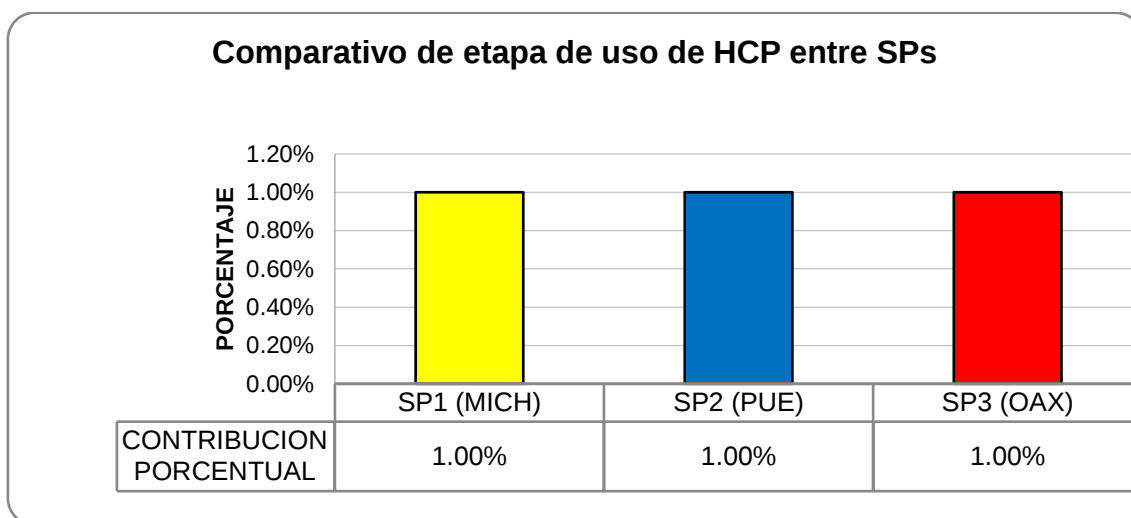


Gráfico 25. Comparativo de etapa de uso de HCP entre SPs.

3.4. FASE IV. INTERPRETACIÓN

Identificación de Puntos Críticos Ambientales (Hotspots)

La fase de interpretación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para los sistemas productivos de Michoacán (SP-1), Puebla (SP-2) y Oaxaca (SP-3) permite identificar patrones comunes y divergentes en el perfil ambiental de la botella de mezcal, además de aquellas etapas o procesos que más impactaron y contribuyeron en la categoría de impacto asociada a la Huella de Carbono.

Los resultados muestran que la Huella de Carbono de la producción artesanal está fuertemente dominada por dos factores principales:

1. Dependencia de Combustibles Fósiles: Son necesarios para diversas etapas dentro del sistema pues se requiere de combustible, específicamente de gasolina para el funcionamiento de maquinaria agrícola en la etapa de cultivo como las bombas de agua, así como en los molinos para desfibrilar el agave en la etapa de molienda, y por supuesto en la etapa de transporte por el uso de vehículos, produciendo grandes cantidades de CO₂ de origen fósil.

2. Manufactura de Insumos: La producción de vidrio para la etapa de envasado se consolida como un impacto significativo en todos los escenarios,

coincidiendo con lo reportado por Maciel et al. (2020), quienes señalan que el envasado puede representar más del 30% del impacto en destilados artesanales si no se utilizan materiales reciclados.

Otras asociaciones como la Comisión Europea también reportan que aproximadamente el 80% del impacto medioambiental de un producto viene determinado por su diseño (European Commission, 2012).

3. Degradación de biomasa. La degradación en suelo del bagazo y las vinazas residuales del proceso de fermentación y molienda producen emisiones de N_2O , el cual es 273 veces más contaminante que el CO_2 (IPCC, 2023), por lo que es fundamental prestar atención a estos residuos para su control y diseñar un buen plan de manejo que logre disminuir si aporte a la huella de carbono de la producción de mezcal.

Análisis Comparativo Inter-Sistemas

A continuación, se discuten los indicadores de desempeño clave, contrastando la eficiencia operativa de los tres sistemas estudiados.

Eficiencia de Conversión de Materia Prima: Este indicador, definido como la cantidad de agave requerida para producir una Unidad Funcional (UF = 0.75 L de mezcal), es un indicador directo de la eficiencia en la hidrólisis (cocción de agave) y fermentación de azúcares.

El sistema productivo 2 de Puebla (SP-2) sobresale por tener una alta eficiencia: con un requerimiento de ~5.3 kg de agave/UF. Este valor es excepcionalmente competitivo, acercándose a los estándares industriales del Tequila, que oscilan entre 6 y 7 kg/L según el Consejo Regulador del Tequila (Centro Mario Molina & Consejo Regulador del Tequila, 2016).

El sistema productivo 3 de Oaxaca (SP-3) obtuvo una eficiencia media con ~6.67 kg/UF, se sitúa en un rango típico para mezcales artesanales, donde la literatura reporta valores entre 12 y 16 kg de agave por litro para procesos tradicionales menos tecnificados (CIATEJ, 2014).

El sistema productivo 1 de Michoacán (SP-1) resultó con una baja eficiencia ya que obtuvo una demanda entre ~9.47 y 10 kg/UF. Esta diferencia de casi el doble respecto al SP-2 sugiere áreas de oportunidad críticas. Esto puede deberse a factores biológicos como una menor concentración de grados Brix en la especie *A. cupreata* (común en Michoacán) frente a *A. potatorum* o *A. angustifolia*, o ineficiencias en la molienda y extracción de jugos, podrían explicar esta diferencia.

Consumo energético térmico

El consumo de leña para las etapas de cocción y destilación es un indicador de sostenibilidad y nos indica la cantidad energética necesaria para satisfacer un fin en común, la cocción de las piñas de agave en horno/pozo para los tres casos de estudio.

El SP-1 (Michoacán) presenta la mayor intensidad con 10.65 kg leña/botella, el SP-2 (Puebla) arrojó un consumo de 7.05 kg leña/UF, mientras que el SP-3 (Oaxaca) reporta un consumo sorprendentemente bajo de 2.63 kg leña/botella. Esto podría atribuirse a la eficiencia y diseño de los hornos empleados tanto en la cocción como en la destilación y las pérdidas de energía existentes en cada uno.

Gestión del Recurso Hídrico

Aunque el consumo de agua requerida para los procesos industriales no representa un impacto o contribución directa en la huella de carbono y que no es una categoría de impacto mencionada por la ISO 1467 para ser estimada (norma a seguir en este trabajo de investigación), se menciona su impacto en este apartado como huella azul, es decir la cantidad de agua dulce proveniente de ríos, lagos o acuíferos, requerida para producir bienes o servicios (IMTA, 2019) ya que es un líquido vital para el planeta y su manejo actual representa una crisis hídrica a nivel global.

La huella de agua azul varía drásticamente según la etapa del proceso, en la tabla 16 se muestran los resultados obtenidos, los valores están expresados por Unidad Funcional (UF), es decir, la cantidad de agua en litros necesaria

para producir una botella de mezcal joven de 750 ml. a partir de la técnica artesanal.

Tabla 16. Huella Hídrica por Sistema.

Sistema Productivo	Huella de Agua Total (L/botella)	Nivel de Impacto	Punto Crítico (Hotspot)
SP-2 (Puebla)	14.89 L	Alto	Destilación (71% del total)
SP-3 (Oaxaca)	9.66 L	Medio	Balanceado (Cultivo y Destilación)
SP-1 (Michoacán)	5.45 L	Bajo	Cultivo (80% del total)

La etapa de destilación en el SP-2 de Puebla muestra un alto consumo de agua (~10.6 L/UF), muy superior a los ~4 L/UF de SP-1 y SP-3. Esto sugiere el uso de sistemas de enfriamiento/destilación más eficiente. El SP-1 de Michoacán presenta el mayor consumo en la etapa agrícola (4.38 L/UF), lo que indica que la práctica de riego demanda un mayor aporte.

Discusión Comparativa con la Literatura

Al contrastar los resultados obtenidos con estudios previos del sector mezcalero y tequilero, se observan las siguientes tendencias (Tabla 17).

Tabla 17. Comparativa de resultados con reportados en la literatura.

Indicador	Resultados del Estudio (Rango SP1-SP3)	Referencia Externa / Literatura	Interpretación

Huella de Carbono	1.3 - 2.0 kg CO₂eq/botella 750 ml. Mezcal artesanal (Estimado en base a gráficos previos)	<i>Maciel et al. (2020): 1.7 kg CO₂eq/botella 750 ml. (Mezcal Artesanal).</i> <i>Ruiz-Camou et al. (2023): 2.1 kg CO₂eq/botella 750 ml. (Mezcal Artesanal).</i> <i>CRT (2020): 3.03 kg CO₂eq/L (Tequila promedio).</i>	Los sistemas artesanales analizados en este estudio se encuentran dentro del rango de los reportados en la literatura, por lo que se demuestra que existe cierta relación entre los insumos y cantidades empleadas y el impacto ambiental generado (Huella de Carbono de Producto).
Uso de Agave	5.3 - 10.0 kg/UF	<i>CIATEJ / FAO: 12 - 16 kg/L.</i> <i>Industria Tequilera: 6 - 7 kg/L</i>	El SP-2 demuestra que la producción artesanal puede alcanzar eficiencias de conversión comparables a la industria tecnificada. El SP-1 se mantiene en rangos tradicionales de baja eficiencia.
Uso de Agua	4 - 15 L agua/L mezcal (Proceso)	<i>SUEZ, (2020): ~20 L agua / L mezcal.</i> <i>Industria Gral mezcal: 15 - 20 L agua/L mezcal</i>	Los tres sistemas (SP-1, SP-2, SP-3) reportan consumos de agua de proceso inferiores al promedio citado en la literatura (20 L), lo cual es positivo, aunque debe verificarse si el inventario de la literatura incluye agua de lavado y otros servicios generales.

El análisis confirma que no existe un sistema productivo "óptimo" a pesar de que el SP-2 contiene la huella de carbono más baja de los tres (1.34 kgCO₂eq) pues mientras algunos sistemas presentan contribuciones muy altas para ciertas etapas otros las contrarrestan y viceversa por lo que cada caso de estudio representa un sistema al cual es necesario proponer estrategias de sostenibilidad adaptadas al contexto regional/local, y no sobre soluciones genéricas para el sector mezcalero.

PROPUESTA DE MITIGACIÓN Y REDUCCIÓN DE HUELLA DE CARBONO DE PRODUCTO POR SISTEMA

Basado en la interpretación de los resultados en la categoría de impacto de cambio climático para la estimación de la huella de carbono, se proponen las siguientes estrategias de mitigación de emisiones de GEI:

Eco-diseño de envase: Dado el alto impacto del vidrio, es prioritario reducir el peso de la botella o implementar programas de retorno y uso de vidrio reciclado, pues como se mostró en el análisis de sensibilidad, si se realiza un reúso de la botella de por lo menos 5 veces podemos reducir el impacto hasta en un 27% de la HCP, esto representa una estrategia crítica para los tres sistemas productivos.

Eficiencia en el transporte: Es necesario buscar alternativas distintas a los vehículos empleados para el traslado de la materia prima y del producto final, debido a que los vehículos utilizados actualmente ya no son modelos recientes y su eficiencia energética es muy baja por lo que se emplea una mayor cantidad de combustible.

Aunado a eso, sería importante también buscar alternativas más cercanas a los insumos requeridos, favoreciendo que las distancias de traslado sean más cortas para evitar un mayor consumo de combustible.

Evitar el uso de polímeros en actividades agrícolas: Tratar de evitar el uso de plásticos en zona de vivero, como el uso de almácigos de poliestireno (unicel) para el cultivo de las plántulas de agave, como es el caso del SP-3 donde la producción de este insumo representó el 27% del total de la huella (gráfico 10). En vez de ello tratar de cultivar en camas de cultivo de tierra en suelo o elevadas.

Optimización Térmica: Para el SP-1, se recomienda modificar los hornos de combustión para que sean más eficientes y con ello reducir la cantidad de leña empleada.

Biocombustibles a partir de los residuos: Una parte importante de la producción son los residuos obtenidos de la etapa de fermentación y molienda,

nos referimos al bagazo de agave y las vinazas, el cual para los tres casos estos residuos se disponen en el mismo sitio del palenque o cerca de él para su degradación en suelo. Para evitar el desperdicio de estos residuos, se sugiere aplicar un manejo especial o un tratamiento, por ejemplo, en el caso del residuo del bagazo de agave se pudiera usar para la fabricación de biocombustibles sólidos que generen energía necesaria para otras etapas del sistema, un ejemplo es en la cocción de las cabezas de agave o en la destilación del mezcal, donde se requiere energía calorífica y se podrían emplear este tipo de biocombustibles. Estudios recientes como el de Escudero et al. (2024) han destacado la viabilidad de generar pellets a través de los residuos de agave, sin embargo, se requiere de análisis y estudios futuros que corroboren la capacidad y viabilidad de estos materiales para satisfacer la tarea requerida en el sistema de producción.

En el caso de las vinazas resultantes, éstas se les puede dar un tratamiento ya sea físico-químico o biológico y neutralizarlas para que no representen un riesgo ambiental mayor, algunos estudios ya han corroborado la eficacia de ciertos componentes químicos para su tratamiento como Iñiguez & Hernández (2010) y otros mediante reactores biológicos anaerobios como Robles et al. (2012).

Como se mencionó anteriormente, las recomendaciones se proponen con base a cada sistema productivo y no tienen la intención de modificar la técnica de producción artesanal empleada por los maestros mezcaleros ni mucho menos alterar las características físico-químicas del mezcal.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación permitió evaluar el impacto ambiental de distintos Sistemas de Producción (SPs) de destilados de agave, específicamente de la producción de mezcal, demostrando que la Huella de Carbono del Producto (HCP) generada por dichos sistemas se encuentra dentro del rango de los valores reportados previamente en la literatura (1.35 - 2.02 kgCO₂e/botella. en este estudio). Este hallazgo valida la consistencia de los modelos presentados y proporciona una línea base confiable para el sector.

A través del análisis, se identificaron los puntos críticos de impacto o *HotSpots* para los tres sistemas estudiados, los cuales se concentran principalmente en tres áreas: la manufactura del vidrio durante la etapa de empaque, el transporte de insumos en la etapa de transporte general, y el uso de combustibles fósiles asociado a las actividades de cultivo y molienda.

Para hacer frente a estas áreas de oportunidad, los modelos derivados de este estudio sugieren desplegar propuestas de reducción a la HCP fundamentadas en los principios de la economía circular. Entre las estrategias de mayor relevancia se encuentran el fomento al reúso de la botella de vidrio y la implementación de un plan de manejo sustentable de residuos (bagazo y vinazas). Uno de los hallazgos más significativos de este análisis es que es plenamente factible disminuir la HCP sin necesidad de alterar o modificar la técnica de producción artesanal, lo que asegura la viabilidad ambiental del producto preservando su identidad tradicional.

Finalmente, como parte de las perspectivas de esta investigación, se sugiere la realización de estudios futuros que centren sus esfuerzos en la evaluación de la HCP considerando otras técnicas de producción. Asimismo, resulta de especial interés para el sector evaluar el impacto ambiental diferenciado por

especie de agave en particular, con el fin de generar perfiles ecológicos más precisos y específicos.

REFERENCIAS

Arboleda, J. A. (2005). Manual de evaluación de impacto ambiental (EIA) de proyectos, obras o actividades. Academia.edu. https://www.academia.edu/14204956/Manual_de_evaluaci%C3%B3n_de_impacto_ambiental_EIA_de_proyectos_obras_o_actividades

Arellano-Plaza M, Paez-Lerma Jb, Soto-Cruz No, Kirchmayr Mr&Gschaedler Mathis A (2022). Mezcal Production In Mexico: Between Tradition And Commercial Exploitation. *Front. Sustain. Food Syst.* 6:832532. Doi: 10.3389/Fsufs.2022.832532

Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Subdirección de Meteorología (Bogotá, Colombia). 96p.

Barraza-Soto, S., Domínguez-Calleros, P. A., Montiel-Antuna, E., Návar-Chaidez, J. J., & Díaz-Vásquez, M. A. (2014). LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL EN EL MUNICIPIO DE DURANGO, MÉXICO. *Ra Ximhai*, 10(6), 65-74.

Bjorn, A., Owsianiak, M., Molin, C., & Laurent, A. (2018). Main Characteristics of LCA. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Eds.), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (pp. 9-16): Springer.

Bowen, S., and Zapata, A. V. (2015). Geographical indications, terroir, and socioeconomic and ecological sustainability: The case of tequila. *J. Rural Stud.* 25, 108–119. doi: 10.1016/j.jrurstud.2008.07.003

Caballero, M. C., Bernabé, J. L. M., & Silva, M. E. (2023). Evaluación de parámetros dinámicos en desfibrado mecánico de hojas de Agave angustifolia Haw en verde. DOI: 10.59920/BWHB9861

Cano, N., Berrio, L., Carvajal, E. et al. (2023). Assessing the carbon footprint of a Colombian University Campus using the UNE-ISO 14064–1 and WRI/WBCSD GHG Protocol Corporate Standard. *Environ Sci Pollut Res* 30, 3980–3996. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22119-4>

CEDEÑO, M. C. (1995) TEQUILA PRODUCTION, CRITICAL REVIEWS IN BIOTECHNOLOGY, 15:1, 1-11, DOI: 10.3109/07388559509150529

Centro Mario Molina & Consejo Regulador del Tequila (2016). Sustainability strategy for the agave-tequila production chain. Recuperado el 18 de octubre de 2023 de: [Estrategia-de-Sustentabilidad-2016-eng.pdf](https://centromariomolina.org/Estrategia-de-Sustentabilidad-2016-eng.pdf) (centromariomolina.org).

Chavez-Parga, M. D. C., Hernández, E. P., & Hernández, J. C. G. (2016). Revisión del agave y el mezcal. Revista Colombiana de Biotecnología, 18(1), Article 1. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>

Christine, A., Mathis, G., Gallardo Valdez, J., & Villanueva Rodríguez, S. (S.F). El Proceso De Elaboración Del Mezcal En El Estado De Michoacán. Obtenido El 16 De Octubre De 2023 De: <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/758/1/El%20proceso%20de%20elaboraci%C3%B3n%20del%20mezcal.Pdf>

CIATEJ. (2014). Diagnóstico de la Cadena Productiva Maguey-Mezcal en los Estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.

Climate Change: Vital Signs of the Planet. (2022). ¿Cuál es la diferencia entre el cambio climático y el calentamiento global? – Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/faq/91/cual-es-la-diferencia-entre-el-cambio-climatico-y-el-calentamiento-global/>

Colman, T. & Păster, P. (2009). Red, White, And 'Green': The Cost Of Greenhouse Gas Emissions In The Global Wine Trade. Journal Of Wine Research, 20(1), 15-26. Doi: 10.1080/09571260902978493

Comercam. (2023). Informe Estadístico 2023. https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/Informe-2023_Publico.Pdf

Conesa Fernández-Vítora, (1997). V. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental, Madrid, MundiPrensa.

CUADRAT, S. (2011). HUELLA DE CARBONO DE LA INDUSTRIA VITIVINÍCOLA. RECUPERADO EL 18 DE OCTUBRE DE 2023 DE:

[HTTPS://WWW.EOI.ES/SITES/DEFAULT/FILES/SAVIA/DOCUMENTS/COMPONENTE67285.PDF](https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente67285.pdf).

Curran, M. (2014). Fortalezas y limitaciones de la evaluación del ciclo de vida. En: Klöpffer, W. (eds) Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment. Compendio de LCA – El mundo completo de la evaluación del ciclo de vida. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3_6

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2016). NORMA Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6437/seeco11_C/seeco11_C.html

Escudero-Enríquez, E., Martínez-Guido, S. I., Lara-Montaña, O. D., & Gutiérrez Antonio, C. (2024). Elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave. Perspectivas De La Ciencia Y La Tecnología, 240-256. <https://doi.org/10.61820/pct.vi.1082>

Espinoza, P. A. (2021). Impacto Ambiental derivado del campo de aerogeneradores La Venta I, Oaxaca. (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia. Michoacán.

Esqueda V., M., M. L. Coronado A., A. H. Gutiérrez S. & T. Fragoso G. (2011). Agave angustifolia Haw. Técnicas para el transplante de vitroplantas a condiciones de agostadero. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México 20 p.

Estrella Suárez, M. V., & González Vázquez, A. (2017). Desarrollo sustentable: un nuevo mañana. Grupo Editorial Patria.

European Commission (2012). Ecodesign your future how ecodesign can help the environment by making products smarter. <https://data.europa.eu/doi/10.2769/38512>.

Fava, J.A., Denison, R., Jones, B., Curran, M.A., Vigon, B., Selke, S., Barnum, J. (1991). A technical framework for life-cycle assessment. SETAC Foundation, Vermont.

Feijoo G., Hospido A., Gallego A., Rivela B., Moreira M.T. (2007). Análisis de ciclo de vida (II): Metodología y etapas. *Ingeniería Química* 444:114-125

Feijoo, Gumersindo & Moreira, Maria. (2020). Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono: Casos Prácticos. 10.13140/RG.2.2.11030.50240/1.

Financiera Rural. (2011). *Monografía del Mezcal*. SECRETARIA DE RELACIONES EXTERIORES. Recuperado el 13 de octubre de 2023, de: <https://embamex.sre.gob.mx/belice/images/stories/docs/mezcal.pdf>

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of environmental management*, 91(1), 1-21.

Fullana i Palmer, P., & Puig, R. (1997). *Análisis del ciclo de vida*. Rubes, Barcelona.

García Mendoza A J, Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad C (2023). Sistemática y distribución actual de los Agave spp mezcaleros. Version 1.13. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/yucttt> accessed via GBIF.org on 2023-10-13.

Guinée, J. B. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Springer.

Hauschild, M. Z., & Huijbregts, M. (2015). *Life Cycle Impact Assessment*. Springer.

Heijungs, R., & Suh, S. (2002). *The Computational Structure of Life Cycle Assessment*. Springer.

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA) (2019). Huella Hídrica. Recuperado el 21 de diciembre de 2025 a de: <https://www.gob.mx/imta/articulos/huella-hidrica>

INEGI. (2017). ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DE... LA ACTIVIDAD DE ELABORACIÓN DE CERVEZA. Recuperado el 18 de octubre de 2023 de: https://www.inegi.org.mx/Contenidos/Productos/Prod_Serv/Contenidos/Espanol/Bvinegi/Productos/Nueva_Estruc/702825096649.Pdf

INEGI. (2019). COLECCIÓN DE ESTUDIOS SECTORIALES Y REGIONALES. CONOCIENDO LA INDUSTRIA DEL TEQUILA Y MEZCAL. Recuperado el 18 de octubre de 2023 de:

https://www.Inegi.Org.Mx/Contenidos/Productos/Prod_Serv/Contenidos/Espanol/Bvinegi/Productos/Nueva_Estruc/702825189600.Pdf

Intedya (s.f). Guía rápida de aplicación de ISO 14064-1 Sistema de Gestión Huella de Carbono. Recuperado el 06 de octubre de 2023 de https://www.intedya.com/productos/Plantilla_NORMAISO14064-1.pdf

Iñiguez, G.,&Hernández, R. (2010). Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). Revista internacional de contaminación ambiental, 26(4), 299-311.

IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

ISO. (2018-B). ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification.

ISO. (2006). ISO 14040: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework: International Standard Organization.

ISO. (2018-A). ISO 14064-1:2018: Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals.

Maciel Martínez, J., Baltierra-Trejo, E., Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q.,&Marquez-Benavides, L. (2020). Life cycle environmental impacts and energy demand of craft mezcal in Mexico. Sustainability, 12(19), 8242.

Mijangos, O. F., López, J.,&Luna, J. (2013). Metodologías para la identificación y valoración de impactos ambientales. Temas de Ciencia y Tecnología. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez.

Olmos, X. (2012). La huella de carbono en el comercio internacional: el caso de las viñas chilenas. Universidad de Chile, Magister en Estrategia Internacional y Política Comercial.

Pelaez, J. D. L., & CORREA, J. A. (2004). Evaluación del impacto ambiental de proyectos de desarrollo. Universidad Nacional de Colombia.

Peñaranda, G., Vanegas, P. C., & Castañeda, M. (2022). Cálculo de Huella de Carbono: Revisión de elementos clave para el desarrollo de una herramienta operacional. *Revista Semillas del Saber*, 2(1), 60-65.

Perevochtchikova, M. (2013). Environmental impact assessment and the importance of environmental indicators. *Gestión y política pública*, 22(2), 283-312.

Robles-González, V., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of biotechnology*, 157(4), 524-546.

Ruiz-Camou, C., Núñez, J., & Musule, R. (2023). Evaluating the environmental performance of mezcal production in Michoacán, México: A life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-14.

Salvador, A. G., Alcaide, A. S., Sánchez, C. C., & Salvador, L. G. (2005). Evaluación de impacto ambiental (pp. 55-65). Pearson Educación.

Schneider, H. y Samaniego, J. (2010). La huella de carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Naciones Unidas. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3753/S2009834_es.pdf?sequence=1

Seale & Associates. (2021). Industria De Bebidas Alcohólicas En México. Recuperado El 18 De octubre De 2023 De: [Http://Mnamexico.Com/Wp-Content/Uploads/2021/03/Alcoholic-Beverages-Esp.Pdf](http://Mnamexico.Com/Wp-Content/Uploads/2021/03/Alcoholic-Beverages-Esp.Pdf)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018). Definición y objetivo de la evaluación del impacto ambiental. gob.mx. Recuperado el 2 de

octubre de 2023, de <http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/definicion-y-objetivo-de-la-evaluacion-del-impacto-ambiental>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018). Impacto ambiental y tipos de impacto ambiental. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/impacto-ambiental-y-tipos-de-impacto-ambiental>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBGIR)*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 27 de noviembre de 2025, de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>

SEMARNAT (2025). Actualización de la Contribución Determinada a nivel Nacional 3.0 de México. Gobierno de México.

Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"*. SETAC Press.

SUEZ Water Technologies&Solutions. (2022, 28 de septiembre). SUEZ comparte que el valor del agua es mayor de lo imaginado [Comunicado de prensa]. Comunicae. <https://www.comunicae.com.mx/notas-de-prensa/suez-comparte-que-el-valor-del-agua-es-mayor>.

Taboada, M. A., Cosentino, V. R. N., & Costantini, A. O. (2018). Emisiones de óxido nitroso desde suelos agrícolas y alternativas para mitigarlas.

Trespalacios, J., Blanquicett, C., & Carrillo, P. (2018). Gases y efecto invernadero. BASILEA. https://www.academia.edu/38002440/Gases_y_efecto_invernadero.

Universitat Politècnica de Catalunya. s.f. Análisis del Ciclo de Vida. Facultad de Ingeniería.

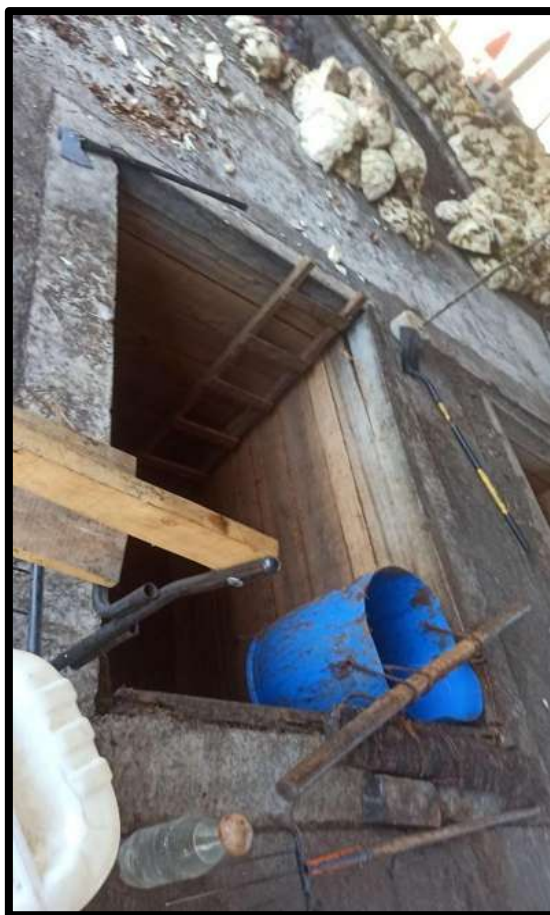
ANEXOS

Fotografías del proceso productivo en palenque del SP1 (MICH).









Rodrigo Alejandro Arriaga Suárez

ESTIMACIÓN DE HUELLA DE CARBONO MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL SISTE...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:582746826

Fecha de entrega

24 abr 2026, 4:09 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

24 abr 2026, 4:23 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

ESTIMACIÓN DE HUELLA DE CARBONO MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE V....pdf

Tamaño del archivo

5.9 MB

140 páginas

31.264 palabras

170.590 caracteres

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión

Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental	
Título del trabajo	"Estimación de Huella de Carbono mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida del sistema productivo Agave-mezcal"	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Lic. Rodrigo Alejandro Arriaga Suárez	2354960a@umich.mx
Director	Dra. Liliana Márquez Benavides	liliana.marquez@umich.mx
Codirector	Dr. Ricardo Musule Lagunes	musuleiq@gmail.com
Coordinador del programa	Dr. Salomón Ramiro Vasquez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
-------	-------------	-------------

Asistencia en la redacción	SI	Para revisión de errores de ortografía y redacción
----------------------------	----	--

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	SI	Ayuda en localización de sitios web oficiales de búsqueda académica
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	SI	Generación de imágenes alusivas al texto

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Rodrigo Alejandro Arriaga Suárez
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 21 de abril de 2026