



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
INSTITUTO DE ECOLOGÍA
SISTEMAS ENERGÉTICOS

“EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DEL USO DE BIOMASA RESIDUAL DE *Agave tequilana* Weber (var. azul) PARA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL 2G”

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:

ANA LAURA MORALES GARCÍA

TUTORA PRINCIPAL:

DRA. IDANIA VALDEZ VAZQUEZ-INSTITUTO DE INGENIERÍA UNIDAD JURQUILLA

COMITÉ TUTOR:

DRA. LEONOR PATRICIA GÜERCA – INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

DRA. HELENA COTLER ÁVALOS – CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS DE INFORMACIÓN
ESPACIAL

DR. HÉCTOR MAURICIO NÚÑEZ AMÓRTEGUI – CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA
ECONÓMICAS, A.C.

DRA. ANA ELENA ESCALANTE HERNÁNDEZ – INSTITUTO DE ECOLOGÍA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CGEP /PCS/017/2024
Asunto: Asignación de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su sesión 41 del 13 de noviembre de 2018, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **Morales García Ana Laura** con número de cuenta **517011065**, con la tesis titulada "Evaluación de la sostenibilidad del uso de biomasa residual de Agave tequilana Weber (var. azul) para producción de bioetanol 2G", bajo la dirección de la Dra. Idania Valdez Vazquez.

PRESIDENTA: DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECA HERNÁNDEZ
VOCAL: DR. HÉCTOR MAURICIO NÚÑEZ AMORTEGUI
SECRETARIA: DRA. ANA ELENA ESCALANTE HERNÁNDEZ
VOCAL: DRA. HELENA COTLER ÁVALOS
VOCAL: DRA. IDANIA VALDEZ VAZQUEZ

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 26 de enero de 2024.



Dr. Alonso Aguilar Ibarra
Coordinador
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad (PCS) por todo lo aprendido dentro y fuera de las aulas, a la Coordinación del PCS por su apoyo en trámites académicos, asesoría y amable atención durante este proceso.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca número 621257 otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

Al Fondo de Sustentabilidad Energética 2014-05 de la Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del Clúster de Biocombustibles Lignocelulósicos para el Sector Transporte (No. 249564) del Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE BIO) por el financiamiento otorgado.

Al Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas (LIPATA) del IINGEN Unidad Juriquilla por las facilidades brindadas en el desarrollo de la presente investigación.

A la Dra. Idania Valdez Vazquez por su confianza para formar parte de este proyecto, su asesoría, paciencia, mucha paciencia y dedicación en este trabajo cuyos grandes retos hemos aprendido a superar, por su empuje en el camino a llevarme a encontrar mi pasión.

Al Consejo Regulador del Tequila (CRT) por las facilidades otorgadas para realizar las entrevistas, por abrirnos las puertas y proporcionarnos datos que sustentan aún más esta investigación. En particular, al Ing. Crescenciano Velázquez Cervantes Verificador Agrícola en el CRT, por su invaluable apoyo, por las pláticas, por su amabilidad, asesoría, las visitas a campo, todo lo aprendido del agave, el tequila y lo que engloba esta agroindustria en el hermoso Estado de Jalisco y toda la zona DOT.

A la M. en I. Carolina Arellano, por todo su apoyo, por las asesorías a deshoras, por el constante ir y venir de dudas y respuestas, gracias por el esfuerzo conjunto. Al Dr. Christian Arturo Hernández Hernández, por su apoyo en las salidas de campo y en los análisis de laboratorio.

A los miembros de mi comité: Dra. Idania Valdez, Dra. Leonor Patricia Güereca, Dra. Helena Cotler, Dr. Héctor Núñez, Dra. Ana Escalante, cuyos comentarios abonaron a la mejora de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

Por su valioso tiempo y acceder a formar parte de esta investigación (en orden alfabético):

Gerardo Amesola Fonseca
Andrés de Jesús Carrillo Anaya
Álvaro Montes Rivero
Daniel Partida Rivera
David Partida Rivera
Enrique Partida Zúñiga
Fernando Real Meza
Salvador Rosales Torres
Felipe Tovar Rivera
Francisco Javier Vázquez Hernández
Raúl Zepeda Gómez
Casa Agave Azul
Casa tequilera de Arandas
Tierra de Agaves
Tequila Cascahuin
Tequila Charro
Tequila Embajador
Tequila El viejito
Tequila Hacienda de Oro
Tequila Las Américas
Tequilera La Madrileña
Tequila Miravalle
Tequila Selecto de Amatitán

A todos aquellos que participaron activamente en recorridos de campo, brindando datos a través de buenas conversaciones que enriquecieron este trabajo.

DEDICATORIA

A mi mamá Florinda y mi papá Eloy quienes me han dado el apoyo siempre para seguir adelante, por el cariño, los consejos y lecciones de vida que ambos me han enseñado.

A mis hermanos Juan, Rusbel, Elio aunque a veces estemos lejanos, deseo que encontremos aquello que soñamos.

A mis abuelos Feliciano, Inés, María de Jesús y Virgilio que me han mostrado el camino y de dónde vengo para saber a dónde quiero llegar.

A mi familia, aquella arraigada a la cultura del mezcal y que me ha dado una historia de la cual aprender, una que trataré de engrandecer a base de esfuerzo.

A mi bisabuelo paterno, que a pesar de no conocerte estoy segura que me heredaste la pasión por el campo y los magueyes.

A mi tío Héctor, mi tía Norma y Teo quienes me inspiran día a día, a Ana “del pasado” ten por seguro que todo mejora.

A mis amigxs de la Segunda Generación del Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, de quienes aprendí tanto y me han hecho descubrir las cosas de las que soy capaz. Al Team Foráneo, las llevo por siempre en el cora, a mi Azu, Gaby, Martha, Viri, Ale qué increíbles tardes en el depa y la hermosa etapa que nos hizo fortalecer nuestra amistad con el paso de los años, les agradezco todo lo que me han contenido en este tiempo, por sus consejos y porras en todo momento para levantarme y volver a comenzar, por ser mi red de apoyo, las admiro y quiero mucho. A mis compañerxs de Sistemas energéticos por las andanzas y la buena onda, a Andy por darme asilo cuando llegué a Morelia y por las cosas vividas en estos años, Montse por las risas y momentos compartidos, Esther por tu objetividad siempre, Mariana, Brenda, Ivan, son importantes para mí. Gracias por todo lo vivido y el apoyo en todo momento. Las palabras no son suficientes.

A mis amigxs de ECOTEC Rosy y Daniel por escucharme y aconsejarme tanto tantas veces, son bien chingones y siempre aprendo algo de ustedes, Alfredo por su apoyo y confianza, Jorge, Fer, Belén, Dante, JuanCa, Sarai, a Eslava, Liza, quienes han confiado en mí desde el día uno, a Iris por su amistad y darme asilo cuando llegué a la CDMX, a Indira y Andrés por su apoyo y amistad, les admiro y quiero mucho. A Karenina, por impulsarme y creer en mí aun cuando yo misma no lo he hecho. A Polar por su compañía y amor.

A la Unidad de Ecotecnologías, al Grupo de Innovación en Ecotecnología y Bioenergía (GIEB), al M.C. Alfredo Fuentes y al Dr. Omar Masera quienes me han dado la oportunidad de desarrollarme profesionalmente en estos años y me impulsan a buscar nuevos horizontes en lo académico y lo personal.

A la vida por la fortuna de ser vivida a pesar de todo, a la música que me acompaña en todo momento. Al cúmulo de historias que van caminando conmigo y se van esparciendo, aquellas que se enriquecerán de las vivencias que he tenido a lo largo de estos años y los que aun me faltan.

Una pandemia, varias crisis existenciales, decepciones, enojos, alegrías y aprendizajes después aquí sigo.

Un día a la vez.

RESUMEN	12
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Panorama energético global	14
1.2. PANORAMA ENERGÉTICO DEL AUTOTRANSPORTE EN MÉXICO	18
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1. BIOENERGÍA, BIOMASA Y BIOCOMBUSTIBLES: EL USO DEL ETANOL EN EL SECTOR AUTOTRANSPORTE.....	22
2.2. Etanol 1G e impactos	24
2.3. Etanol 2G e impactos	26
3. SOSTENIBILIDAD DE LA BIOENERGÍA.....	27
3.1. Sostenibilidad y metas de la sostenibilidad de la bioenergía	27
3.1.1. El concepto de Sostenibilidad.....	27
3.1.2. La sostenibilidad de la bioenergía.....	30
3.2. Marcos de sostenibilidad de la energía	32
3.2.1. Marco Global Bioenergy Partnership	32
3.2.2. Otros marcos aplicados en la evaluación de la sostenibilidad de la bioenergía	33
3.2.3. Marcos locales para la evaluación de la sostenibilidad de la producción de bioenergía	36
4. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DE LA BIOENERGÍA	40
4.1. Indicadores ambientales.....	41
4.2. Huella hídrica	42
4.3. Huella de carbono	46
4.4. Indicadores socioeconómicos	49
4.5. Número de empleos	50
4.6. Ingreso	50
4.7. Rentabilidad.....	51

5.	EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGAVE-TEQUILA	52
5.1.	EL SISTEMA PRODUCTIVO DE <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul).....	52
5.1.1.	FACTORES AMBIENTALES DEL <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul)	53
5.1.2.	Factores de manejo.....	54
5.1.3.	Factores económicos.....	55
5.1.4.	Factores socioculturales.....	59
6.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	60
6.1.	Hipótesis	60
7.	OBJETIVOS.....	61
8.	METODOLOGÍA.....	62
8.1.	Delimitación del sistema y unidad funcional	63
8.1.1.	El proceso de producción del <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul), tequila y la generación de residuos (con énfasis en pencas y bagazo).....	63
8.1.2.	El uso de la biomasa residual de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) para la producción de etanol 2G	67
8.1.3.	Etapas de generación de biomasa	68
8.1.4.	Transporte de biomasa	70
8.1.5.	Etapas de transformación de biomasa	71
8.1.6.	Unidad funcional	72
8.1.7.	Planteamiento de escenarios	72
8.2.	Cálculo de indicadores en etapa de generación de biomasa.....	75
8.2.1.	Sitios de estudio y tamaño de muestra.....	75
8.2.2.	Cálculo del índice de residuo (IR).....	77
8.2.3.	Cálculo de la huella de carbono.....	80
8.2.4.	Cálculo de la huella hídrica	94
8.2.5.	Cálculo de indicadores sociales (empleos e ingreso)	101
8.2.6.	Cálculo de indicadores económicos: rentabilidad.....	104
8.3.	Cálculo de indicadores en etapa de transporte de biomasa	106
8.3.1.	Cálculo de huella de carbono en el transporte de la biomasa	107
8.3.2.	Cálculo de indicadores sociales: empleos e ingreso.....	108
8.3.3.	Cálculo de indicadores económicos	110
8.4.	Cálculo de indicadores en etapa de transformación de biomasa en etanol 2G.....	111
8.4.1.	Cálculo de huella de carbono y huella hídrica	112
8.4.2.	Cálculo de indicadores sociales (empleos e ingreso)	112
8.4.3.	Cálculo de indicadores económicos	113

8.5.	Cálculo de indicadores ambientales, sociales y económicos globales	114
8.5.1.	Huella de carbono global	114
8.5.2.	Huella hídrica global	115
8.5.3.	Indicadores sociales globales	116
8.5.4.	Indicadores económicos globales	118
8.6.	Integración de indicadores ambientales, sociales y económicos de la generación, transporte y transformación de biomasa.....	119
9.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	120
9.1.	Etapa de generación de biomasa.....	121
9.1.1.	Selección de los sitios de estudio y tamaño de la muestra	121
9.1.2.	Cálculo del índice de residuo (IR).....	124
9.1.3.	Inventario de emisiones de GEI en el cultivo de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul)	127
9.1.4.	Huella de carbono en la etapa de generación de biomasa	131
9.1.5.	Huella hídrica en la generación de biomasa	140
9.1.6.	Cálculo de indicadores sociales en la etapa de generación de biomasa	145
9.1.7.	Cálculo de indicadores económicos en la etapa de generación de biomasa	148
9.2.	Etapa de transporte de biomasa	149
9.2.1.	Huella de carbono en la etapa de transporte de biomasa.....	149
9.2.2.	Indicadores sociales en la etapa de transporte de biomasa	151
9.2.3.	Indicadores económicos en la etapa de transporte de biomasa.....	152
9.3.	Etapa de transformación de biomasa	153
9.4.	Indicadores globales de la producción de bioetanol 2G con biomasa residual de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul).....	155
9.5.	Análisis de la sostenibilidad del uso de la biomasa de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) para la producción de bioetanol 2g	165
10.	CONCLUSIONES.....	168
11.	BIBLIOGRAFÍA	171
ANEXO A. ECUACIONES UTILIZADAS PARA LA NORMALIZACIÓN DE LOS INDICADORES EN LA EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL 2G A PARTIR DE RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE TEQUILA.		178
ANEXO B. GUÍA DE LAS PREGUNTAS REALIZADAS EN CAMPO		180

ANEXO D. DATOS BASE PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL TRANSPORTE DE LA BIOMASA A LA BIORREFINERÍA	188
ANEXO E. DATOS DE LA FRACCIÓN DE ASIGNACIÓN DE IMPACTOS UTILIZADA EN EL CÁLCULO DE IMPACTOS AMBIENTALES Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA BIOMASA DE A. tequilana Weber var. azul EN LOS SITIOS DE ESTUDIO.....	189
ANEXO F. DATOS DEL INVENTARIO DE EMISIONES ASOCIADAS AL CULTIVO DE A. tequilana Weber var. azul EN LOS SITIOS DE ESTUDIO.....	191

Índice de Tablas

Tabla 1. Indicadores propuestos por la GBEP para evaluar la sostenibilidad de la bioenergía (FAO, 2011 The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy).	35
Tabla 2. Principios considerados para la sustentabilidad de la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal en la NMX-AA-174-SCFI-2015 (resumen).	39
Tabla 3. Índice de residuo (IR) para la biomasa residual de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul).	76
Tabla 4. Número de puntos de muestreo (resumen).	78
Tabla 5. Factores de emisión de materia seca quemada y potenciales de calentamiento global (PCG) de los principales gases de efecto invernadero generados en la quema de biomasa (Minx et al., 2021; IPCC, 2019; Myhre et al., 2013; IPCC, 2006).	86
Tabla 6. Factores de emisión para plaguicidas en la etapa agrícola de la producción de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) (Lal, 2004).	87
Tabla 7. Datos utilizados para el cálculo de la huella de carbono en el transporte de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) del campo a una tequilera ubicada en Tequila, Jalisco.	91
Tabla 8. Estaciones meteorológicas tomadas como referencia para datos climáticos del cultivo de <i>A. tequilana</i> Weber (var. Azul).	98
Tabla 9. Valores de coeficiente único del cultivo para <i>Agave sisalana</i> durante las distintas etapas de su crecimiento utilizados para <i>A. tequilana</i> Weber (var. azul). (FAO, 2000).	99
Tabla 10. Flujos de entrada de la biorrefinería de alimentación simple. Adaptado de Sánchez <i>et al.</i> , 2016.	111
Tabla 11. Descripción de los sitios de estudio seleccionados en el Estado de Jalisco, México.	122
Tabla 12. Municipios con mayor generación de biomasa residual de <i>A. tequilana</i> , 2010-2015. Cálculos realizados con base en datos del SIAP, 2017.	123
Tabla 13. Descripción de los cultivos de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) en los sitios de estudio elegidos. Elaboración propia con datos determinados en campo y obtenidos de información proporcionadas por el CRT.	124
Tabla 14. Índice de residuo (IR) calculado en este estudio para la biomasa residual de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul).	125
Tabla 15. Producción de biomasa residual de agave (hojas y bagazo) estimado con datos de campo.	126
Tabla 16. Compuestos lignocelulósicos de la biomasa residual (bagazo y hojas) de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) colectadas en campo.	127
Tabla 17. Inventario de prácticas agrícolas para el cultivo de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) para el ciclo mayo de 2012 a abril de 2018.	128
Tabla 18. Uso de maquinaria y consumo de combustible en el cultivo de <i>A. tequilana</i> Weber (var. azul) durante el periodo mayo 2012 – abril 2018.	129
Tabla 19. Emisiones GEI promedio asociadas al transporte de piñas de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) al sitio de producción de tequila.	138
Tabla 20. Emisiones GEI promedio de la etapa de generación de biomasa residual de <i>A. tequilana</i> Weber var. azul, con asignación de impactos calculada para los sitios de estudio.	139
Tabla 20a. Emisiones GEI promedio de la etapa de generación de biomasa residual de <i>A. tequilana</i> Weber var. azul, referida a la unidad funcional (1 MJ etanol) utilizada en este estudio.	139
Tabla 21. Huella hídrica de la etapa de generación de la biomasa residual de <i>A. tequilana</i> Weber (var. azul) con asignación de impactos para los escenarios evaluados.	143

Tabla 21a. Huella hídrica de la etapa de generación de la biomasa residual de <i>A. tequilana</i> Weber (var. azul) referida a la unidad funcional (1 MJ etanol) utilizada en este estudio.	144
Tabla 22. Número de empleos y salarios en la etapa de generación de biomasa residual de <i>A. tequilana</i> Weber (var. azul).	145
Tabla 23. Costos de producción de la biomasa de pencas generada en el cultivo de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) y costo del bagazo generado en la producción de tequila.	148
Tabla 24. Huella de carbono del transporte de pencas y bagazo de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) a la biorrefinería ubicada en el municipio de Tequila, Jalisco.	150
Tabla 25. Número de empleos y salarios (MXN) en la etapa de transporte de biomasa residual de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul).	152
Tabla 26. Rendimientos de bioetanol 2G en una biorrefinería alimentada con biomasa de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) para los escenarios evaluados.	154
Tabla 27. Salarios totales por etapa de la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul).	162
Tabla 28. Costos asociados a las etapas de producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) en MXN. Elaboración propia.	163
Tabla 29. Costos de bioetanol 2G producido de biomasa residual de <i>Agave tequilana</i> Weber (var. azul) versus costo de gasolina en México. Elaboración propia.	163

RESUMEN

La producción de biocombustibles de segunda generación (2G) es una alternativa para mitigar los impactos del cambio climático en el sector autotransporte a nivel mundial, aunado a esto, diversos estudios han demostrado que existe la materia prima suficiente para ser transformada en bioalcoholes como el bioetanol y biobutanol. En México, una opción es utilizar los residuos provenientes de la agroindustria tequilera tales como pencas generadas en la jima del agave y el bagazo producido en la elaboración del tequila.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la sostenibilidad del uso de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber var. azul para la producción de bioetanol 2G en toda la cadena (fase agrícola e industrial), ya que existen pocos trabajos en México con un enfoque más amplio de biocombustibles líquidos 2G. La investigación se dividió en tres fases: (1) delimitación del sistema y planteamiento de escenarios, (2) cálculo de indicadores ambientales, sociales y económicos para cada etapa, y (3) integración de indicadores teniendo como unidad funcional 1 MJ de bioetanol producido. Este estudio consideró dos escenarios referentes al uso de biomasa de agave para producir bioetanol: en el E1 solo se utiliza bagazo y en el escenario E2 se utiliza bagazo y pencas como materia prima.

Los sitios seleccionados para este estudio fueron Atotonilco el Alto, Amatitán y Arandas en el Estado de Jalisco, con datos en campo se calculó que estos tres municipios en conjunto podrían abastecer hasta 66,000 t de biomasa residual por año (pencas y bagazo), lo que podría abastecer una biorrefinería para producción de etanol 2G con capacidad de 200 t/día. Para ambos escenarios, la huella de carbono total 127 g CO₂ eq/MJ etanol para el E1 y 139 g CO₂ eq/MJ etanol para el E2 con una contribución del 96% del total en la etapa de transformación de la biomasa en bioetanol.

En cuanto al consumo de agua total, este es de hasta 2.8 L H₂O/MJ para ambos escenarios. Para los indicadores socioeconómicos, se generan hasta 52 empleos totales en el E1 y hasta 62 empleos en el E2, mientras que el costo de producción de bioetanol va de 3.23 MXN/MJ para el E1 y 3.77 MXN/MJ en el E2.

La evaluación de sostenibilidad indica que los dos escenarios son semejantes en cuanto a los impactos ambientales que generan, mientras que los indicadores sociales señalan que el E2 es ligeramente mejor por la posibilidad de una mayor generación de empleo e ingresos, lo que impacta en el aspecto económico,

Si nos enfocamos en la transformación de la biomasa, el E2 implica una mayor inversión económica y un mayor costo de bioetanol/MJ producido, siendo el punto que más resalta en la comparación de sostenibilidad de ambos escenarios. Por este motivo, en la evaluación global es más sostenible el escenario 1 utilizando bagazo generado en la producción de tequila para su transformación a bioetanol 2G.

Para optimizar el proceso de transformación de la biomasa en etanol, es necesario mejorar etapas dentro del esquema planteado para disminuir las emisiones GEI y consumo de agua. Dichos puntos tienen potencial de mejora conforme se vayan desarrollando tecnologías que tengan aplicación a nivel industrial. Además, es importante visualizar cadenas de traslado de la biomasa generada en un sitio a la planta de transformación.

Finalmente, para fortalecer la sustentabilidad de la industria tequilera es necesario un enfoque multidisciplinario para generar soluciones a demandas específicas en el sector tequilero. Esto incluye tener una visión holística de la producción de destilados, considerar los recursos (ambientales, económicos, humanos) implícitos y cómo mejorar su manejo para impulsar una transformación de fondo en dicho sector.

Palabras clave: Tequila, Biocombustibles líquidos, Sistema de producción de bioenergía.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PANORAMA ENERGÉTICO GLOBAL

Actualmente, estamos transitando de un mundo con abundancia de recursos, a otro que se caracteriza por la escasez y la sobreexplotación (González Reyes, 2020). Esta sobreexplotación se relaciona con el uso y dependencia de las fuentes de combustibles fósiles que se ha comprobado tienen impactos negativos sobre el clima, ríos, mares, océanos y la biodiversidad y el paisaje (ídem). Lo que ha iniciado una era llamada capitaloceno que involucra el medio capitalista de producción y consumo en el cambio estructural del ser humano con su entorno, y los combustibles fósiles que han permitido su avance a la configuración de una nueva era geológica (González Reyes, 2020).

Ante la crisis climática que esto supone, se ha llevado a reconsiderar la manera en que se produce la energía y los usos finales que se le dan a esta. De acuerdo con Our world in data (Ritchie, 2022), la producción de energía es responsable del 87 % de las emisiones mundiales de GEI lo que ha llevado a plantear la meta de reducir a cero tales emisiones, esto implica un enorme reto a distintos niveles donde la tecnología juega un rol importante tomando en cuenta las etapas desde su producción hasta su uso final y el impacto que ésta tiene en el medio ambiente (ídem).

A partir de 1990 el uso de fuentes de energía renovable ha aumentado en un 2.2% en promedio anual, específicamente para la energía solar fotovoltaica (46.2%) y la eólica (24.3%), seguido del uso de fuentes biomásicas (específicamente para la producción de biogás con un 13.2% anual), energía térmica solar (11.7%), y biocombustibles líquidos (10.4%) (IEA, 2016).

Aunque el incremento en el uso de ER se ha enfocado primordialmente en la investigación y desarrollo de las fuentes eólicas y solares para la producción de electricidad, actualmente la energía geotérmica, y la energía de la biomasa son competitivas o más baratas que las centrales eléctricas de carbón, petróleo y gas para este mismo fin (IRENA, 2017). De acuerdo con (OECD/IEA, 2016) (REN21, 2017) los países más destacados en el desarrollo estas ER son los

pertenecientes a la OCDE¹ entre los que se encuentran Alemania, Australia, Dinamarca, Estados Unidos, Islandia, Suecia, México y China, gracias a los cuales el mercado de energía solar fotovoltaica (FV) se elevó a un total mundial de 227 GW.

La Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés, 2017), reporta que actualmente 164 países alrededor del mundo apoyan abrir nuevos mercados que promuevan el desarrollo de tecnologías de producción y uso de energía renovable, para lograrlo han creado políticas que respaldan estas iniciativas, ya que se ha comprobado que el sector de energías renovables conlleva amplios beneficios socioeconómicos. Tan solo en el 2014, se estimó que a nivel mundial habían 7.7 millones de empleos directos en este sector sin incluir a las centrales hidroeléctricas (IRENA, 2017).

Sin embargo, el diseño de estas políticas debe tomar en cuenta el aprendizaje de experiencias pasadas que aborden las barreras que han impedido el desarrollo de energías renovables tales como los costos de las tecnologías, el impulso al desarrollo empresarial local y el empoderamiento de los grupos sociales marginados y comunidades locales (tal como ocurre en Sudáfrica), mediante mecanismos de apoyo que se adapten continuamente para mantener un entorno estable y atractivo para las inversiones en el sector, garantizando la viabilidad a largo plazo del sistema energético de una manera rentable (IRENA, 2014a). En este sentido, en varios países las subastas² se han convertido en mecanismos que por sí solos o en combinación con otras medidas, proporcionan incentivos al mercado de energías renovables para la producción de electricidad (IRENA, 2015).

Pero ¿qué pasa con las políticas que impulsan el uso de energía renovable en el sector autotransporte? En el 2013, la IEA indicó que el sector autotransporte a nivel global representó un 35% del consumo de energía final seguido de la industria manufacturera (23%) y el sector

¹ Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, agrupa a 35 países que promueven políticas para mejorar el bienestar económico y social alrededor del mundo.

² Las subastas se refieren a mecanismos usados para adquirir licitaciones competitivas para producir o comprar electricidad originada con energía (en este caso) renovable. El producto subastado puede ser de capacidad (MW) o de energía (MWh) (IRENA, 2015).

residencial (21%). En la búsqueda de la diversificación de producción y uso de ER dentro del sector autotransporte, la energía proveniente de la biomasa ha acaparado la atención en últimos años para su implementación en la producción de biocombustibles líquidos a gran escala, lo anterior como una estrategia importante para disminuir los gases de efecto invernadero (GEI) en el sector transporte, que es uno de los principales emisores de CO₂ (Scragg, 2009; UNEP, 2016). Dichas estrategias dirigidas al uso de biocombustibles líquidos en el sector autotransporte, involucran también la creación y ejecución de políticas que tienen como finalidad lograr la transición hacia una economía que no dependa totalmente de combustibles fósiles y sea capaz de suplir la demanda energética de una manera eficiente como el caso de México (Kishore *et al.*, 2004; Johnson *et al.*, 2009).

Las políticas relacionadas con el uso de energía renovable en el sector autotransporte son cada vez más estrictas debido a tratados internacionales como el acuerdo de París, donde la exigencia en cuanto a la acción climática se centra en puntos específicos como la mitigación de emisiones de GEI para reducir los efectos del cambio climático, transparencia y balance global, adaptación de la sociedad para afrontar las consecuencias del cambio climático y toma en cuenta más que en otras ocasiones el papel de las ciudades, regiones y administraciones locales. En este sentido debe mencionarse también que las políticas deben vislumbrar el objetivo 7 de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (planteados por los países miembros de la ONU en el 2015)³ correspondiente al acceso a energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, el cual

³ Los Objetivos del Desarrollo Sostenible son el resultado de una evaluación sobre las metas planteadas con Objetivos de Desarrollo del Milenio, donde se busca ampliar los éxitos alcanzados y lograr lo que no se consiguió anteriormente. Los ODS constan de 17 objetivos que desde el 2016 dirigen esfuerzos para lograr un mundo sostenible en el 2030. Estos nuevos objetivos reconocen que las iniciativas para acabar con la pobreza deben ir de la mano de estrategias que favorezcan el crecimiento económico y aborden una serie de necesidades sociales tales como la educación, la salud, la protección social y las oportunidades de empleo, a la vez que luchan contra el cambio climático y se promueve la protección del medio ambiente (ONU, 2015).

a su vez está relacionado con ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11), producción y consumo responsables (ODS 12) y acción por el clima (ODS 13).

Para lograr las metas ya mencionadas, se espera que los biocombustibles representen más del 90% del total del consumo de energía renovable en el sector autotransporte a nivel mundial (IEA, 2017), esto se alcanzará aumentando su producción alrededor del mundo. Actualmente regiones como Asia son líderes en el crecimiento de este sector debido al incremento en la demanda de combustibles para el transporte, además de su disponibilidad de materias primas y el desarrollo de las políticas gubernamentales de apoyo. Países como Brasil son clave para contribuir con los escenarios de consumo de biocombustibles gracias a sus objetivos nacionales para el 2030 de aumentar el porcentaje de estos a un 18% a su matriz energética, extendiendo el suministro de etanol y con la inclusión de biocombustibles de segunda generación además de la proporción de biodiesel mezclado con diésel (USDA, 2017).

En lo que respecta a la producción de biocombustibles de segunda generación como el etanol, la IEA (2017) reporta un progreso importante en los últimos años, sin embargo, aún no son competitivos a mediana y gran escala con los combustibles derivados del petróleo pues representan solo el 1% en comparación con estos. El pronóstico era que teniendo en cuenta un panorama de mercado y políticas favorables, la producción de biocombustibles 2G podría ser un 13% más alta, pero aun acelerando la participación de los biocombustibles en la matriz energética mundial durante el 2017, la demanda de combustible para el transporte por carretera solo alcanzaría el 5% para 2022 (IEA, 2017).

En IEA, (2020) se menciona que con la pandemia de COVID-19 cambiaron los escenarios de producción y consumo de energía en diferentes sectores, esto incluye el transporte, en los años por venir se sabrá si los cambios en la movilidad son positivos o negativos en términos de sus impactos en el uso final de la energía.

1.2. PANORAMA ENERGÉTICO DEL AUTOTRANSPORTE EN MÉXICO

¿Con qué contamos para hacer efectiva la transición al uso de energías renovables en el sector autotransporte?

En México, la producción total de energía primaria durante el 2015 fue de 8,261 PJ, con 7,203.8 PJ provenientes de hidrocarburos, mientras que para el 2017 la producción disminuyó a 7,027 PJ de los cuales 5,940.6 provenían de hidrocarburos. De acuerdo con los datos disponibles de reservas y producción de petróleo, desde el 2008 las exportaciones de crudo han disminuido por tres causas: el crecimiento de su demanda interna, el decaimiento de la producción y el descenso de las reservas probadas⁴, motivo por el que la situación energética en nuestro país es preocupante (Ortuño, 2009; PEMEX, 2017; Sistema de Información Energética, 2019).

Tomando como eje el crecimiento económico proyectado para los próximos años, el consumo energético aumentará y los hidrocarburos seguirán representando un papel esencial dentro de la matriz energética del país. Aunado a esto, aunque recientemente empresas privadas han encontrado reservas petroleras en territorio mexicano, el porcentaje de recuperación de crudo es bajo (Ruiz, 2017). De acuerdo con la Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad (PLANEAS, CONAHCYT, 2023) México importa gran parte de la energía que consumimos, ya que en 2021 se importó de Estados Unidos y otros países el 72% del gas natural, el 59% de gasolina y el 46% de diésel. Dichas circunstancias dejan ver el problema de la falta de seguridad energética que existe en nuestro país.

Esta situación lleva a cuestionarse acerca de la generación de energía renovable en México, la cual durante 2021 representó 1,042.97 PJ provenientes de fuentes energéticas como la hidráulica, geotérmica, solar, eólica, biogás y biomasa, esta última con una producción de 349.55 PJ donde 103.95 PJ se originaron a partir de bagazo de caña y 245.59 PJ de leña.

⁴ Se refiere a la cantidad de petróleo y gas que se estima es extraíble de reservas conocidas, bajo condiciones económicas y operativas existentes (Ortuño, 2009).

En relación al consumo final de energía, en el Balance Nacional de Energía (SENER, 2021), se reporta que en el sector transporte, se consumen 2,784.64 PJ del total (5,402.34 PJ) , sin embargo, el 69.93% del transporte proviene de gasolinas y diésel (25.7 %) sin figurar el uso de energías renovables o de biomasa en dicho sector hasta ese año.

En CONAHCyT, (2023) se hace mención a que hasta el inicio de la crisis mundial por la pandemia, el parque vehicular en México creció un 6.4 % anual, uno de los motivos es la baja inversión en transporte público frente a una cultura orientada al uso del automóvil particular, que históricamente ha recibido enormes subsidios a combustibles como la gasolina, el diésel y el gas natural por mencionar algunos (Fossil Fuel Subsidies, 2023).

Para lo anterior, es importante la búsqueda de alternativas para mitigar las emisiones provenientes de este sector, una de ellas es el uso de bioetanol como un sustituto de los combustibles fósiles para las flotas de vehículos ligeros (López-Ortega et al., 2021). A nivel mundial, en 70 países ya se usan mezclas de bioetanol y gasolina donde la materia prima para el bioetanol es principalmente maíz y caña de azúcar, pero estos siguen siendo de primera generación. Las tecnologías avanzadas para producción de etanol 2G aún se encuentra en desarrollo (ídem).

Respecto a proyectos de producción de biocombustibles a gran escala en México, en 2017 el Instituto Mexicano del Petróleo reportó que existían algunos de etanol de primera generación a partir de cultivos como caña de azúcar y sorgo donde los procesos de producción se basan en la fermentación enzimática de azúcares.

Esto representa la posibilidad de usar energías renovables para incursionar en la producción de biocombustibles que se empleen en el sector autotransporte. Sin embargo, debido a la polémica suscitada por el uso de cultivos tales como maíz y caña de azúcar para producir energía por ser básicos en la cadena alimenticia y que se promueve el cambio de uso de suelo a monocultivos, es necesario plantear alternativas dentro de las que se incluyen la biomasa residual de plantas, de cultivos agrícolas o de residuos agroindustriales como fuente de materia prima para la producción de biocombustibles que no compitan directamente con las fuentes primarias de

alimentos y que no representen una amenaza en la alza de los precios de estos productos (Núñez, 2016).

En México el uso de biomasa residual para su aprovechamiento energético como biocombustibles representa un área de oportunidad interesante, ya que se cuenta con diversas materias primas tales como bagazo de caña de azúcar, residuos sólidos orgánicos municipales, mazorcas de maíz, paja de trigo, bagazo de Agave y pulpa de café. Dichas fuentes de biomasa residual podrían proveer de oportunidades en diferentes sectores comerciales, generando un desarrollo económico regional en las zonas que exploten este recurso de manera sustentable.

Otro punto importante es que durante los últimos años en nuestro país se han realizado cambios significativos en las políticas públicas para mejorar el desarrollo de las energías renovables (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010; Ruiz *et al.*, 2016).

Por este motivo, actualmente el sector energético mexicano se encuentra en constante cambio para lograr la producción y el uso de las energías renovables. Con la creación de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable en 2001, la publicación en el Diario Oficial de la Federación (DOF) de la Ley General de Cambio Climático (2012), la Ley de Transición energética (2015), y de forma más reciente, el reglamento de la Ley de Transición Energética en 2017⁵ nuestro país inicia un reto planteado como estrategia nacional para disminuir la dependencia hacia los combustibles fósiles y lograr una economía baja en carbono⁶ (Nader, 2009; Li *et al.*, 2014; Bauer *et al.*, 2015).

Como parte de dicha estrategia, en el 2016 se creó el Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIEBIO) dentro del cual se encuentra el CEMIE Bioalcoholes, en donde se propone: *“...Consolidar y transferir en el corto plazo tecnologías desde el estado del arte hacia el sector industrial para la producción de bioetanol lignocelulósico 2G para su uso en el sector autotransporte”*.

⁵ Publicado el 4 de mayo de 2017 en el Diario Oficial de la Nación

⁶ Economía baja en carbono: Se basa en la disminución de las emisiones de CO₂ mediante el uso de energías renovables, con el objetivo de contrarrestar el cambio climático sin frenar el desarrollo económico y social.

Sin embargo, para lograr esta meta es necesario conocer el potencial real de las materias primas factibles de ser utilizadas para la producción de biocombustibles 2G, siendo una de ellas la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) por la importancia que ha adquirido la industria tequilera en las últimas décadas y el potencial que representan los residuos generados durante la producción tanto de agave como de tequila. Por tal razón, en este trabajo se pretende abordar un enfoque de sostenibilidad para evaluar el uso de estos residuos en la generación de bioetanol 2G.

Sumado a esto, en el año 2018 se publicó en el DOF los “Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros”, en ese documento se abre la posibilidad de la producción y distribución de bioetanol lignocelulósico siempre y cuando cumpla con lo establecido para su uso en motores de combustión interna (Diario Oficial de la Federación, 2018).

Para febrero del 2020, el actual Gobierno de México hizo pública su estrategia para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios que incluye varias líneas de acción que faciliten el acceso al financiamiento para “la producción de bioenergía sustentable, impulsar la inversión necesaria para atraer biocombustibles al mercado y fomentar la investigación científica sobre la producción de bioenergéticos y sus impactos económicos y ambientales” (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA), 2020). También mencionan la necesidad de ampliar y fortalecer las normas de calidad de los combustibles de forma responsable, con la finalidad de permitir una transición ordenada al uso de tecnologías y combustibles más limpios.

En la misma línea, a partir del año 2019, el Consejo nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT antes CONACyT), ha impulsado una transición energética justa y sustentable que, como mencionan en su sitio web: “apuesta por una transformación integral y por el desencadenamiento de acciones para reducir el consumo de energía, aumentar la participación de los renovables y asegurar un acceso justo a la energía”, a través del Comité Ejecutivo del Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronaces EyCC) y

mediante Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (Pronaiis) articulando investigación sobre problemáticas nacionales concretas y colaborando con distintos sectores para buscar soluciones integrales con un abordaje multidimensional e interdisciplinario, entre las problemáticas que se pretenden abordar está la movilidad en México, ya que dentro de las principales demandas se encuentran la distribución y logística, así como la electromovilidad y transporte público (PRONACES EyCC, s.f.).

Dichas estrategias y proyectos dan cabida a la investigación en el tema de los biocombustibles a partir de residuos, en este trabajo específicamente se pretende evaluar la sostenibilidad del uso de la biomasa de agave generada en la industria tequilera para la producción de bioetanol 2G por el potencial que esta materia prima representa en el país, lo que se irá desglosando en las secciones siguientes.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. BIOENERGÍA, BIOMASA Y BIOCOMBUSTIBLES: EL USO DEL ETANOL EN EL SECTOR AUTOTRANSPORTE

La bioenergía es la energía derivada de la biomasa por lo que es la mayor fuente de energía renovable existente en el mundo. De acuerdo con su origen, la biomasa puede clasificarse en: primaria que es toda la biomasa derivada directamente de la fotosíntesis y residual que se refiere a la derivada de transformaciones por medio de actividades con algún tipo de intervención humana y su uso específico se enfoca en la producción de calor, electricidad y combustibles líquidos, sólidos y gaseosos obtenidos principalmente a partir de materia orgánica de actividades agrícolas, pecuarias y comerciales. Por esta razón, la bioenergía es considerada la única fuente de energía renovable capaz de reemplazar los combustibles fósiles en todos los sectores de uso final y su papel en la transición energética es clave para descarbonizar la economía global (Ley

promoción y desarrollo de bioenergéticos, 2008; García-Bustamante y Masera-Cerutti, 2016, PLANEAS, 2023).

Algunas de las ventajas de este tipo de energía son: es versátil, es escalable, actualmente se encuentra disponible comercialmente para su producción y uso a mediana escala, además puede almacenarse y transportarse en comparación con fuentes intermitentes como la solar, eólica e hidroeléctrica. En términos socioeconómicos la producción de bioenergía puede promover la creación de empleos, pues tan solo en el 2016 se generaron 2.7 millones de empleos vinculados a este sector enfocados en el suministro de materia prima a nivel mundial (REMBIO, 2011; Kong *et al.*, 2014; Dale *et al.*, 2015; IRENA, 2017).

Entre el 2020 y 2021 se generaron 2.42 millones de empleos en la producción de bioetanol y biodiésel a nivel mundial, de estos, alrededor de 168,400 corresponden a Brasil e involucran puestos de trabajo en el cultivo de caña de azúcar, y 167,800 en el procesamiento de etanol en 2020. La cifra también incluye una estimación aproximada de 200,000 empleos indirectos en la fabricación de equipos y 326,900 empleos en biodiesel en 2021. (IRENA & ILO, 2022).

Otros países que generaron empleos en el sector de biocombustibles líquidos son Indonesia, Colombia, Tailandia, Malasia y Filipinas, aunque éstos fueron informales y estacionales (Ídem).

Dentro del sector autotransporte, el ejemplo más representativo de bioenergía son los biocombustibles obtenidos a partir de distintos tipos de biomasa, como el bioetanol producido a partir de maíz o caña de azúcar, y el biodiesel obtenido usando aceite de soya, y palma⁷; estos también pueden producirse a partir de residuos agrícolas, municipales, forestales y excretas de animales⁸.

Sin embargo, la principal barrera para el uso de cultivos alimentarios como maíz en la producción de biocombustibles es que genera un impacto negativo en el medio ambiente y la seguridad alimentaria, por lo que resulta insostenible a largo plazo desarrollar un mercado que involucre la producción de alimentos y de combustibles. Por esta razón, han surgido cuestionamientos sobre cómo mantener la cadena de suministro de alimentos y a la vez tener acceso a combustibles sin

⁷ Biocombustibles de primera generación (1G)

⁸ Biocombustibles de segunda generación (2G)

comprometer las necesidades alimenticias y energéticas de la sociedad actual. En este sentido, los biocombustibles 2G o biocombustibles lignocelulósicos se presentan como una solución a los impactos que involucran los 1G. Tomando en cuenta que la mayoría de las materias primas lignocelulósicos provienen de residuos o pueden cultivarse en tierras marginales con restricciones de agua y bajo requerimiento de nutrientes, teóricamente es difícil que la tierra dedicada a actividades agrícolas de primera calidad se vea amenazada. Por esta razón, a medida que se desarrollen nuevas tecnologías de conversión se espera que se diversifique el uso de los residuos de cultivos susceptibles a transformarse en biocombustibles 2G (Vertés *et al.*, 2010; Cambero y Sowlati, 2014; Koizumi 2015; Shibu y Bhaskar, 2015).

Debido a las barreras mencionadas previamente, para el caso del etanol, a nivel mundial el 99% se produce con tecnologías 1G, y el resto con tecnologías 2G, esto porque las primeras son maduras, escalables y transferibles, mientras que las 2G aun se encuentran en investigación y desarrollo a pesar que hay pretratamientos utilizados a escala laboratorio (con intenciones de llevarse a piloto) para la producción de biocombustibles 2G como la hidrólisis, líquido iónico, la explosión de vapor y el ácido diluido, aunadas a tecnologías de conversión como la fermentación, la digestión anaerobia, pirólisis, gasificación por mencionar algunas (Delfin-Ruíz *et al.*, 2021; Becerra-Pérez *et al.*, 2023; Diniz *et al.*, 2023).

2.2. ETANOL 1G E IMPACTOS

Los biocombustibles líquidos más utilizados en la actualidad en el sector autotransporte son el etanol y el biodiesel. El etanol, también conocido como etil alcohol, tiene una estructura química básica compuesta por carbono e hidrógeno ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), se utiliza principalmente como aditivo para elevar el octanaje de la gasolina y promover una combustión más limpia. Convencionalmente, el etanol se produce a través de la conversión enzimática de cultivos con alto contenido de almidones en azúcares, para después llevar a cabo la fermentación en etanol, o mediante la fermentación de azúcares de seis carbonos en etanol; posteriormente se destila el producto hasta obtener el grado de pureza requerido para su uso como combustible.

El etanol puede obtenerse a partir de varias materias primas, sin embargo, los azúcares más empleados para su producción a gran escala son los derivados de cultivos agrícolas como maíz, caña de azúcar y sorgo, además de otros con gran potencial como trigo y yuca, cuyos azúcares pueden hidrolizarse y fermentarse para producir etanol 1G (IEA, 2010; Zabed *et al.*, 2017).

El mercado de etanol 1G como combustible está bien establecido en países como Brasil y Estados Unidos. La producción industrial de etanol de 1G en el mundo, comenzó a partir de la década de 1970 debido a la crisis del petróleo que llevó a varios países a buscar alternativas para abastecerse de combustibles económicos y eficientes. Sin embargo, la industria de producción de etanol para su uso como combustible comenzó en Brasil con la promulgación del Programa Nacional de Alcohol (Proálcool), que priorizó la producción de etanol mediante el apoyo de la expansión del cultivo de caña de azúcar, el desarrollo de infraestructura con la construcción de destilerías de etanol y la fabricación de automóviles que funcionaban solo con etanol (E100); para la década de 1980 en Brasil habían más de 4 millones de vehículos de este tipo (Dias de Moraes *et al.*, 2014; Monteiro *et al.*, 2016).

Bajo las condiciones del mercado petrolero en esta misma década (1970), donde dominaban los precios altos y volátiles del petróleo, Estados Unidos también lanzó su propio programa de producción de etanol a finales de la década, utilizando maíz como materia prima, lo cual originó una industria creciente de etanol en dicho país. Para el 2005, Brasil y Estados Unidos seguían siendo líderes en la producción de etanol combustible del mundo. Actualmente el etanol se usa en mezclas de 5% -10% con gasolina (E5, E10) o como E-85 en vehículos de combustible flexible⁹. En Brasil, el contenido mínimo de etanol en gasolinas debe ser del 22% (Dias de Moraes *et al.*, 2014; Monteiro *et al.*, 2016).

A pesar de las ventajas que representa la producción de etanol 1G a gran escala en los países ya mencionados, existen reportes de impactos causados por el crecimiento de esta industria, principalmente la transformación de los sistemas de cultivo a monocultivos que representan una amenaza para el desarrollo de plantaciones destinadas a la producción de alimentos, además que su cultivo origina la degradación del suelo y el consumo de recursos hídricos por el uso excesivo

⁹ Son vehículos que funcionan con más de un tipo de combustible, ya sea gasolina sin plomo, E85 o una combinación de ambos; están equipados con componentes modificados, diseñados para ser compatibles con las propiedades químicas del etanol, lo que garantiza un buen funcionamiento con diversas mezclas de etanol (NREL, 2017).

de fertilizantes y maquinaria agrícola. Asimismo, su producción está asociada al aumento de emisiones de GEI y la pérdida de biodiversidad debido al incremento de la deforestación a causa del cambio de uso de suelo, además se han generado conflictos sociales por la tenencia de tierra en poblaciones rurales y en la cadena de producción no se ha tomado en cuenta la seguridad energética¹⁰ de las comunidades lo cual se menciona en trabajos como Ewing y Msangi, 2009; Finco y Doppler, 2010; Janssen y Rutz, 2011; Miyake *et al.*, 2012; Cambero y Sowlati, 2014; Días Moraes *et al.*, 2015 y Koizumi, 2015.

Lo anterior señala claramente que tanto el etanol 1G, y en general los biocombustibles 1G no han sido ambiental ni socialmente factibles en ciertos casos a gran escala, por lo que, ante la posibilidad de promover la producción y uso de biocombustibles 2G al mismo nivel, es necesario realizar estudios que demuestren si realmente serán una solución a las problemáticas que conllevan los 1G.

2.3. ETANOL 2G E IMPACTOS

Derivado de los cuestionamientos generados con la producción de etanol 1G, se ha planteado el uso de biomasa lignocelulósica cuya composición principal es celulosa, hemicelulosa y lignina, como materia prima para producir etanol. En este sentido la investigación en el uso de energía renovable para el sector autotransporte se ha centrado en producir bioetanol, a partir de residuos de maíz, bagazo de caña, paja de trigo, residuos forestales, pastos y árboles cultivado como cultivos energéticos tales como Miscanthus (*Miscanthus giganteus*) y Mallee (*Eucalyptus*, *Eucalyptus polybractea*, *Eucalyptus loxophleba* subsp. *Lissophloia* por mencionar algunas especies)¹¹ (Yu *et al.*, 2015; Robertson *et al.*, 2017). Sin embargo, la tecnología que puede usarse

¹⁰ La seguridad energética se refiere al acceso a la energía por las comunidades en las cuales se establecen los grandes proyectos de bioenergía, ya que en ocasiones dichas comunidades no tienen garantizado el acceso a la energía producida con sus propios recursos biomásicos.

¹¹ Los mallees son árboles bajos con múltiples ramas, que se pueden cosechar en un ciclo corto (por ejemplo, de 3 a 7 años) y luego se regeneran rápidamente como monte bajo. Estos son la vegetación dominante en las zonas semiáridas de Australia en lugares donde se tienen lluvias durante el invierno. Las especies más representativas de Mallee son los Eucalyptus.

para generar etanol 2G aún se encuentra en desarrollo por lo cual no es competitiva a nivel económico y comercial en varios países incluido México.

A pesar de esto, el hecho de que la demanda de etanol 2G esté aumentando en países europeos y Estados Unidos, propicia a que la investigación e implementación a escala piloto e industrial pueda darse en los próximos años; tomando en cuenta que una de las ventajas principales es el bajo costo de la materia prima, además que se evita una competencia directa e indirecta con cultivos alimenticios (incluyendo alimento para animales).

Dentro de los impactos positivos del etanol 2G, están que se reducen los riesgos ambientales asociados a la degradación del suelo y la contaminación de agua y aire, asimismo, su producción está tomando en cuenta (además del aspecto económico), una variedad de rutas para producir etanol y el uso de los subproductos en biorrefinerías y trata de involucrar a los actores involucrados en este proceso (Gnansounou y Dauriat, 2010).

3. SOSTENIBILIDAD DE LA BIOENERGÍA

3.1. SOSTENIBILIDAD Y METAS DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA BIOENERGÍA

3.1.1. EL CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD

La crisis ambiental y el crecimiento poblacional cobraron mayor visibilidad en la segunda mitad del siglo XX, a causa de estos hechos, en 1972 un grupo de empresarios y científicos conformaron el denominado “Club de Roma” y elaboraron el informe titulado “los límites del crecimiento” donde se aborda dicha problemática. En ese mismo año, se convocó a la primera Cumbre de la Tierra en la cual se tomaron en cuenta las cuestiones ambientales como un tema de amplia importancia y se decidió crear el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), lo que marcó un punto de partida en el desarrollo de la política internacional medioambiental.

Sin embargo, el concepto de desarrollo sustentable se estableció hasta 1987 con la publicación del Informe Brundtland (WECD, 1987) y a partir de ese año ha cobrado importancia hasta convertirse en uno de los elementos clave en el manejo de recursos de todo tipo, naturales, alimentarios, energéticos, etc., y actualmente forma parte de las agendas gubernamentales de varios países alrededor del mundo.

Dicho concepto se definió como “...la capacidad para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades” (ONU, 1987); dentro de este se distinguen las dimensiones social y ambiental, y la dimensión económica se asume de manera implícita. En la cumbre de Río de Janeiro (1992) el concepto se hizo operativo e incluyó explícitamente la dimensión económica¹² (ONU, 1997; Delgado *et al.*, 2015).

En textos como (Hussain & Velasco-Muñoz, 2021) se menciona que un problema del concepto “desarrollo sustentable” es su ambigüedad, puesto que la definición de “necesidades” no es clara, esto es, las necesidades de países “desarrollados” y las de países “sub desarrollados” no son las mismas, tampoco hay un período de tiempo en la definición, por lo que “generaciones” no está claro. Esto hace la definición difícil de entender, motivo por el que en distintos niveles y escalas (gobierno, empresas, personas) se lleva a la práctica de manera diferente.

Otras publicaciones como la de Delgado *et al.*, (2015) en Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, (2015) refieren que desde el PNUMA en la década de los 90’s, el discurso dominante de desarrollo sustentable recae en la dimensión económica al impulsar la economía verde (es decir, un crecimiento económico infinito en un planeta finito) al mencionar que “la protección ambiental y el crecimiento económico no son incompatibles, sino complementarios”. Lo anterior representa una falla importante en la lógica capitalista de producción, que con el paso de los años ha demostrado que una mayor producción y consumo

¹² “la protección ambiental y el crecimiento económico a largo plazo no son incompatibles, sino complementarios...solucionar problemas ambientales requiere de recursos que solo el crecimiento económico puede proveer, mientras que el crecimiento económico no será posible si la salud humana y los recursos naturales se dañan por el deterioro ambiental”.

no precisamente es igual a una mejora en la calidad de vida de las personas por la inequidad en la distribución de recursos a nivel mundial.

En ese sentido, desde hace décadas se ha llevado un debate sobre la multidisciplinaria que involucra alcanzar el desarrollo sustentable para abordar las tres dimensiones principales que menciona el concepto, existen quienes priorizan el aspecto económico sobre el ambiental y social, sucediendo lo mismo con el aspecto social y ambiental, este debate se asocia a la noción de “sustentabilidad débil o fuerte” que pueden traducirse en anteponer la visión antropocéntrica y unilateral de la naturaleza a través del mercado o en anteponer valoraciones multicriterio que pretenden romper el antropocentrismo y la linealidad en la concepción de desarrollo sustentable (Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, 2015; Hussain & Velasco-Muñoz, 2021).

Dentro de la ruptura del antropocentrismo y la necesidad de abordar el desarrollo sustentable como algo operativo y participativo, es como nace el campo de conocimiento de las “Ciencias de la sostenibilidad” que de acuerdo con Kates *et al.*, (2009; 2012) es un campo que integra y vincula equitativamente lo social, lo económico y lo ambiental, reuniendo el conocimiento teórico y la aplicación práctica con un enfoque en diferentes escalas donde los procesos no son lineales y existe una complejidad que puede abordarse únicamente con una perspectiva de múltiples disciplinas, diferentes filosofías de la ciencia y distintas metodologías cuando tienen la visión compartida de que es necesaria la transición de las estructuras sociales, institucionales y las políticas públicas hacia la sostenibilidad (Spangenberg, 2011).

Respecto al uso de los términos “desarrollo sustentable” y “desarrollo sostenible” en la literatura en español, hay un debate acerca de su aplicación y su duración en el tiempo. En una revisión publicada por Gómez Romero & Garduño Román, (2020) mencionan que el desarrollo sostenible se refiere a lo local y el desarrollo sustentable a lo global, lo sostenible es aquello que permanece en el tiempo y lo sustentable es lo inmediato y concreto. Aunque ambos se usan de manera indistinta, Alcántara-Salinas *et al.*, (2017) mencionan que los dos conceptos se han diferenciado

por la posición ideológica que defienden, “desarrollo sostenible” es más utilizado en las ciencias sociales, económicas y políticas, porque su enfoque o principal preocupación es el desarrollo sostenido para que el sistema productivo funcione, bajo la condición de cuidar que los recursos no se agoten. Es un proceso con características económicas que le permite al sistema perdurar en el tiempo.

Por otro lado, el término “desarrollo sustentable” es principalmente utilizado en las ciencias naturales donde el objetivo final es conservar los recursos mediante su uso racional y controlado; es decir, de utilizar los recursos de manera que se garantice su conservación a futuro desde los puntos de vista social, económico y su interacción con el ambiente (Alcántara-Salinas et al., 2017).

Cabe recalcar que la sostenibilidad o sustentabilidad es algo que cambia con el tiempo y en diferentes puntos, por lo que puede evaluarse de manera transversal, comparando dos sistemas, uno alternativo y uno de referencia para conocer el estado del mismo en un tiempo específico (Astier & Masera, 2008).

3.1.2. LA SOSTENIBILIDAD DE LA BIOENERGÍA

La energía es un sector especialmente importante, sin ella nos sería imposible alimentarnos, vestirnos, transportarnos, realizar nuestras actividades cotidianas, acceder a recursos básicos y otros que no lo son tanto, pero ¿realmente se ha considerado cómo la producción y uso de energía han afectado a todas las dimensiones de la sostenibilidad y en qué escala o escalas puede lograrse la sostenibilidad de la energía? ¿de qué manera puede incluirse explícitamente la dimensión social para lograr la transición energética necesaria para mitigar y adaptarse al cambio climático ahora y en las décadas por venir?

Para contextualizar a la bioenergía dentro del concepto de sostenibilidad, es necesario reconocer los componentes ambiental, social, económico e incluso tecnológico de la bioenergía. Dale *et al.*, (2015) señalan que lo ambiental se refiere a la interacción de las propiedades biofísicas y ecológicas tales como las condiciones del suelo, la calidad del agua (superficial y subterránea),

calidad del aire, biodiversidad, emisiones de gases de efecto invernadero y el origen de los recursos utilizados para la producción de energía a nivel local. Esto genera impactos diversos en cuanto a magnitud, la cual puede ir desde escala local hasta global y varían respecto a cuestiones relacionadas con la materia prima, los recursos y la tecnología utilizada en la producción de la energía.

El aspecto económico de la bioenergía abarca los costos relativos asociados con el ciclo de vida de la cadena de suministro y todos sus elementos. Lo anterior significa que los costos de cultivo, procesamiento, distribución y uso final para quienes produzcan y consuman bioenergía deben ser económicamente competitivos con los de otras fuentes de energía. El ámbito social de la sostenibilidad de la bioenergía implica equidad en el acceso a energía y recursos, asegurando que la producción de bioenergía no limite el acceso a alimentos básicos y genere empleos e ingresos, en esta línea se rescata principalmente el derecho a salarios y condiciones de trabajo equitativos en el sector de producción de bioenergía.

En este sentido, es necesario mencionar que el debate de la sostenibilidad de la bioenergía también trata de responder cuestiones tales como ¿qué tipos de bioenergía emiten menos GEI y con qué limitaciones? Y ¿se puede producir suficiente bioenergía en condiciones económicamente viables sin causar impactos ambientales significativos, o sin comprometer los suministros y precios de los alimentos ahora y en el largo plazo? (OECD/IEA, 2017).

Por esto, aunque la definición de sostenibilidad en la bioenergía aún resulta confusa, y aparentemente no toma en cuenta aspectos como la propiedad de la tierra, la seguridad energética, además de la generación de empleos; en las propuestas actuales de generación de biocombustibles 2G se está comenzando a ampliar la visión para no solo incluir el concepto de sostenibilidad, sino que también lo hagan operativo incluyendo las preguntas planteadas en torno a la producción y uso final de la bioenergía (Brinkman, 2018; Sacramento Rivero et al., 2022)). Algunas de estas propuestas son parte de varios marcos conceptuales, como: el marco global Bioenergy Partnership (2011), la metodología para evaluar la sostenibilidad de las

biorrefinerías planteada por Sacramento-Rivero, (2012), la NMX-AA-174-SCFI-2015 que especifica la certificación de sustentabilidad ambiental para la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal, o más recientemente el uso de la metodología MESMIS para evaluar la sostenibilidad de sistemas de producción de bioenergía (Valdez-Vazquez *et al.*, 2017) así como el marco metodológico para evaluar la sustentabilidad de los biocombustibles sólidos en México de Sacramento Rivero et al., (2022) que cubren los aspectos económico, social, ambiental, y dimensiones de sostenibilidad institucional, y sus intersecciones para ser aplicado tanto en usos tradicionales como modernos de la bioenergía.

Es importante resaltar que, para realizar análisis sobre la sostenibilidad de la bioenergía es necesario incluir toda la cadena de suministro, es decir, desde la producción de materia prima, logística de su recolección, conversión industrial, distribución y usos finales para tener un panorama más completo de lo que representa el análisis y generar información sobre los usos finales de la energía producida.

3.2. MARCOS DE SOSTENIBILIDAD DE LA ENERGÍA

3.2.1. MARCO GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP

En el año 2006, 10 naciones y 7 organizaciones internacionales firmaron los términos de referencia para crear la Asociación Global de Bioenergía (GBEP por sus siglas en inglés), para apoyar el uso de biomasa y biocombustibles, particularmente en los países en desarrollo. Dentro de los países asociados se encuentran: Argentina, Brasil, Canadá, China, Alemania, México y Reino Unido. Dos años después, establecieron un grupo de trabajo para promover la producción sostenible y el uso de bioenergía, como resultado se desarrollaron 24 indicadores divididos en las tres áreas de la sostenibilidad (Tabla 1), para ayudar a la formulación de políticas pertinentes en torno al sector de bioenergía.

Las actividades de la GBEP se relacionan con cuatro áreas estratégicas: desarrollo sostenible, cambio climático, seguridad alimentaria y energética; dentro de los principales objetivos de GBEP se encuentran favorecer la transformación del uso de biomasa hacia prácticas más eficientes y sostenibles, y facilitar la integración de la bioenergía en el mercado energético abordando las barreras en la cadena de suministro.

3.2.2. OTROS MARCOS APLICADOS EN LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA BIOENERGÍA

Tal como el marco Global Bioenergy Partnership, existen distintos estudios donde se aborda la sostenibilidad de la bioenergía en la producción de biocombustibles 2G. Dentro de los marcos que se han aplicado para evaluar la sostenibilidad de sistemas de producción de bioenergía se encuentran los desarrollados por Sacramento-Rivero, (2012), en el cual se integran los aspectos más importantes que afectan la sostenibilidad de las biorrefinerías. Este marco se usó como una herramienta de evaluación de la sostenibilidad de la biorrefinería ex -ante (en el diseño) y ex -post (durante el funcionamiento de esta). Para medir la sostenibilidad, el autor tomó en cuenta 15 indicadores divididos en cinco categorías: materia prima, proceso, productos, medio ambiente, y cuestiones laborales de la biorrefinería. La escala de sostenibilidad que propone va de cero a uno donde cero representa la sostenibilidad ideal.

En el aspecto social, el autor menciona que muchos indicadores no permiten una definición de un valor crítico; por esto, la evaluación de este componente necesitaría diferentes herramientas. El marco propuesto también permite la inclusión de nuevos indicadores, siempre que puedan establecerse en la escala de sostenibilidad normalizada. Finalmente, en esta publicación, Sacramento-Rivero, (2012) comenta que pueden incorporarse nuevos indicadores en la evaluación general de la sostenibilidad de las biorrefinerías para realizar un análisis multicriterio cualitativo.

Otro trabajo donde se aborda la sostenibilidad de la bioenergía, específicamente en una biorrefinería, es el publicado por Sánchez *et al.*, (2016) donde se realiza un análisis bidimensional (es decir, ambiental y económico) de una biorrefinería con alimentación múltiple que produce etanol 2G y electricidad a partir de residuos lignocelulósicos y que al mismo tiempo trata residuos agroindustriales (suero de queso y vinazas de tequila).

Dicha investigación propone el uso de un Marco de Sostenibilidad construido mediante el Método de Análisis de Procesos usando como referencia la investigación de Tahir y Darton (2010) y el marco de la Global Bioenergy Partnership mostrados en la Tabla 1 (FAO, 2011) en el que las etapas del proceso de la biorrefinería pueden relacionarse claramente con las que reciben los impactos dentro del proceso de producción de bioetanol. Para realizar la evaluación, los autores diseñaron un diagrama detallado de los componentes que integran la biorrefinería incluyendo el contexto económico, social, geopolítico, técnico y científico.

Los indicadores que usaron en Sánchez *et al.*, (2016) para calcular los principales impactos de la biorrefinería fueron: GEI emitidos, consumo de agua, calidad del agua, cantidad de residuos sólidos producidos, relación de uso final de energía, rendimiento, costo de producción, reducción de las importaciones de combustibles fósiles, fracción del total nacional de bioenergía producida en la planta y productividad eléctrica de la planta.

Tabla 1. Indicadores propuestos por la GBEP para evaluar la sostenibilidad de la bioenergía (FAO, 2011 The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy).

Componente	Indicadores
Ambiental	Ciclo de vida de las emisiones de GEI; uso y eficiencia del uso de agua; calidad del agua; diversidad biológica en el paisaje; uso de suelo y cambio de uso de suelo relacionado a la producción de materia prima para bioenergía.
Social	Asignación y tenencia de tierra para la producción de bioenergía; precio y oferta de la canasta nacional de alimentos; empleos en el sector bioenergía; incidencia de lesiones, enfermedades y muertes ocupacionales.
Económico	Productividad; balance neto de energía; valor agregado bruto; cambio en el consumo de combustibles fósiles y uso tradicional de la biomasa; infraestructura y logística para la distribución de la bioenergía.

De manera reciente, Valdez-Vazquez *et al.*, (2017) han propuesto adaptar el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de recursos naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad¹³ (MESMIS; Masera *et al.*, 1999), para la evaluación de la sostenibilidad de Sistemas de Producción de Bioenergía (SPB). En este trabajo, las autoras reúnen indicadores ambientales, socioeconómicos, de gobernabilidad, de seguridad alimentaria y desarrollan 19 indicadores ambientales para cuantificar los beneficios y los costos de la producción de bioenergía; esto basándose en que los sistemas de manejo de recursos naturales también pueden entenderse como SPB, y haciendo hincapié en la necesidad de nuevos enfoques metodológicos

¹³ Este marco se compone de seis pasos cíclicos: 1. Caracterización del sistema; 2. Identificación de los puntos críticos vinculados a atributos de sostenibilidad (productividad, estabilidad, confiabilidad, flexibilidad, adaptabilidad, equidad y autosuficiencia); 3. Identificación y selección de indicadores; 4. Medición y monitoreo; 5. Análisis e integración de datos; 6. Conclusiones y recomendaciones.

interdisciplinarios para evaluar la sostenibilidad de los sistemas productivos complejos que dependen de los recursos naturales. En el estudio, especifican que usando el marco MESMIS diseñaron un índice de sostenibilidad flexible e inclusivo para evaluar y comparar cualquier SPB, independientemente de su naturaleza utilizando los mismos criterios y con un enfoque en la mejora de la sostenibilidad.

A partir de su análisis, definen cinco categorías de sostenibilidad normalizadas en una escala de 0-1 usando el índice creado, estos son: altamente insostenible; insostenible; moderadamente sostenible; sostenible y altamente sostenible. La propuesta realizada en el estudio de Valdez-Vazquez *et al.*, (2017) “contribuye con el marco conceptual de las evaluaciones de sostenibilidad en general, puesto que la metodología es capaz de encontrar indicadores para cada aspecto o subsistema que refleje los procesos que ocurren dentro de cada uno, mientras se proporciona un valor que puede utilizarse para investigar y medir las interacciones con otros subsistemas”.

3.2.3. MARCOS LOCALES PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA

En marcos más locales para la evaluación de la sostenibilidad de la producción de bioenergía, es importante mencionar que la Norma Mexicana NMX-AA-174-SCFI-2015 establece los requisitos y criterios para obtener la certificación de sustentabilidad ambiental en la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal¹⁴ en las fases de producción de biomasa, transporte y su transformación industrial, la certificación podrá obtenerse en cada etapa o como proceso integrado que incluya todas las etapas; en la misma se señala que es de cumplimiento voluntario. En términos generales, la Norma NMX-AA-174-SCFI-2015 menciona que:

¹⁴ En la Norma Mexicana, se define a estos como bioenergéticos en estado físico líquido a presión y temperatura ambientales (PTN), obtenidos a partir de biomasa proveniente de materia orgánica vegetal. Por lo tanto, el bioetanol obtenido de residuos biomásicos de agave entra en esta categoría.

“La producción ambientalmente sustentable de bioenergéticos debe demostrar, considerando su ciclo de vida, una efectiva reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y un balance energético positivo con respecto a las alternativas de combustibles fósiles. Deben evitarse los impactos sobre áreas de alto valor ambiental, la biodiversidad, las especies endémicas y amenazadas y la fertilidad de los suelos. Asimismo, deben considerarse la conservación en cantidad y calidad de los recursos hídricos y la calidad del aire”.

En dicha Norma se establece la certificación como un instrumento de política que abre la posibilidad de evaluar la sustentabilidad de la producción de bioenergéticos líquidos provenientes de distintas fuentes y procesados con distintas técnicas y verificar su impacto. El documento especifica también que, para obtener el certificado de Bioenergéticos líquidos sustentables, es necesario tener un Plan de Manejo Ambiental y Social (PMAS), que cuente con nueve criterios de sustentabilidad y como requisito fundamental, se establece que la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal debe producir más energía de la que consume en forma de energía no renovable en el ciclo de vida de su producción, finalmente, esta Norma se considera dos niveles de certificación:

- Sustentable. Es el que mediante el análisis de ciclo de vida logra una reducción de emisiones de 35 a 50 % con respecto a los valores de referencia para combustibles fósiles y que alcanzan un índice de rendimiento energético¹⁵ de 2 a 4.
- Sustentable Global. Cumplen con los indicadores, documentación señalada en la Norma, y además mediante el análisis de ciclo de vida muestran una reducción de emisiones mayor al 50 % con respecto a los valores de referencia para combustibles fósiles, y que alcanzan un índice de rendimiento energético mayor a 4.

¹⁵ En la NMX-AA-174-SCFI-2015 se define índice de rendimiento energético como: la relación numérica entre la energía obtenida de un bioenergético y la energía consumida en su ciclo de vida, hasta su entrega en la planta de mezclado. Este puede estar entre 1.5 en adelante, dependiendo de este número podrán clasificarse como “sustentable” o “sustentable global”.

En la Tabla 2 se muestran los criterios de sustentabilidad definidos en la NMX-AA-174-SCFI-2015, como se mencionó anteriormente, tales criterios deben cumplirse en las etapas de producción y procesamiento de la biomasa, producción del bioenergético y su mezclado. Los principios, tal como en marcos anteriores, tienen similitud en indicadores de evaluación de la sostenibilidad de la bioenergía, sobre todo los relacionados con emisiones GEI, uso y calidad del agua, además de empleos.

Tabla 2. Principios considerados para la sustentabilidad de la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal en la NMX-AA-174-SCFI-2015 (resumen).

Principio	Descripción
1. Legalidad	Las Operaciones ¹⁶ de bioenergéticos líquidos de origen vegetal, así como los participantes y titulares en todas las etapas, deben cumplir con el marco legal ambiental nacional e internacional vigente aplicable.
2. Conservación	Se deben implementar prácticas que reviertan o impidan impactos negativos en la biodiversidad y los ecosistemas.
3. Gases de Efecto Invernadero (GEI)	Las etapas de producción de bioenergéticos deben contribuir a la mitigación del cambio climático reduciendo significativamente las emisiones de GEI durante su ciclo de vida comparado con respecto a los combustibles fósiles.
4. Conservación	Se deben implementar prácticas que reviertan o impidan impactos negativos en la biodiversidad y los ecosistemas.
5. Suelo	Deben implementarse prácticas que revierten la degradación del suelo y/o mantengan su calidad.
6. Agua	Se debe mantener o mejorar la calidad y cantidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.
7. Aire	Se debe minimizar la contaminación del aire a lo largo de la cadena de producción de bioenergéticos.
8. Uso de tecnología e insumos y manejo de residuos	Deben usarse tecnologías que maximicen la eficiencia productiva y el desempeño ambiental, y minimicen el riesgo de daños al ambiente y a las personas. Deben implementarse buenas prácticas en el uso, transporte y almacenamiento de agroquímicos.

¹⁶ En la NMX en cuestión, se define operación como actividad de producción, almacenamiento, transformación y/o mezclado realizada por persona física o moral, en predio(s) identificado(s) por sus coordenadas poligonales.

Tabla 2 (continuación). Principios considerados para la sustentabilidad de la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal en la NMX-AA-174-SCFI-2015 (resumen).

Principio	Descripción
9. Desarrollo y Bienestar Social.	Se deben respetar los derechos de los trabajadores y ofrecer alternativas para el desarrollo de las comunidades.
	Se debe contribuir a la mejora de la calidad de vida de los habitantes locales mediante el empleo directo e indirecto, especialmente en regiones vulnerables de acuerdo con el CONEVAL.
	Se deben evaluar los riesgos a la seguridad alimentaria derivados de la implementación del proyecto y mitigar cualquier impacto negativo asociado.

4. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DE LA BIOENERGÍA

Debido a que el enfoque de este trabajo fue realizar una evaluación global de la sostenibilidad de la producción de bioetanol 2G involucrando las fases agrícola e industrial de la producción de tequila, se eligieron indicadores representativos de índole ambiental, social y económica para dar un panorama general del proceso, tomando como referencia los marcos e indicadores de sostenibilidad revisados en la sección anterior. Entre los indicadores seleccionados para lograr esta visión, se encuentran aquellos relacionados con emisiones de GEI, consumo de agua, empleos y rentabilidad para evaluar la sostenibilidad de la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa de *A. tequilana* Weber (var. Azul).

A continuación, se explican dichos indicadores más a detalle.

4.1. INDICADORES AMBIENTALES

Como se ha mencionado en secciones anteriores, el eje ambiental es de suma importancia para la definición de sostenibilidad, sobre todo porque se está tomando acción por mitigar y adaptarse al cambio climático. La visión y cuantificación de los impactos ambientales que generan las actividades antropogénicas a nivel global, permite identificar y actuar en puntos clave que pueden representar un cambio positivo en los ecosistemas, sobre todo aquellos relacionados con agua, aire, suelo, impactos a la salud, entre otros.

Actualmente, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), el consumo de agua y la disposición de aguas residuales provenientes de distintos procesos representan un problema ambiental directamente asociado con la actividad humana en el planeta, dichas emisiones tienen como consecuencia el calentamiento global, cuyos efectos se reflejan en la alteración de los sistemas naturales y los ciclos biogeoquímicos a escala global. En este sentido, la cuantificación de impactos en diferentes escalas ha sido importante para desarrollar medidas específicas de mitigación y adaptación a las consecuencias que esto podría tener a largo plazo en sistemas de interés, en este caso en sistemas de producción de bioenergía (Franca, Ornelas-Ferreira, Costa Corrêa, Ribeiro, & Bassin, 2021).

Una forma de cuantificar y comparar el impacto que tiene la producción de un producto o servicio, es a través de la evaluación de su huella, dicha huella es un indicador de la presión humana sobre el medio ambiente, además que es útil para comprender los cambios e impactos ambientales como el uso de suelo, la degradación de suelo, la contaminación del agua y los impactos resultantes de dichos cambios debido a esta presión (pérdida de la biodiversidad, efectos en la salud humana, por mencionar algunos) en diferentes escalas, desde la local hasta la global. En este contexto, la huella de un producto o servicio, es la suma de las huellas de los procesos a lo largo su cadena de suministro (Hoekstra & Wiedmann, 2014; Mathur et al., 2022).

En tecnologías energéticas para producción y aprovechamiento de bioenergía, algunos de los puntos críticos de índole ambiental que se han identificado debido a los efectos que se espera tener a consecuencia del calentamiento global, se encuentran las emisiones de GEI, los impactos a la calidad del aire, además de la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos utilizados (García Bustamante y Masera, 2016).

Para cuantificar los impactos ambientales de la bioenergía se han utilizado métodos como Análisis de Ciclo de Vida, el cual está estandarizado en las Normas ISO 14040 y 14044, donde es importante considerar el sistema a estudiar, las fuentes y bases de datos de información, así como criterios para la asignación de emisiones a los coproductos del sistema elegido. La elección del método o los indicadores dependen del sistema de interés y su escala de aplicación, ya sea a nivel local, regional o global tal como se muestra en la Tabla 3 (Brinkman, 2018).

Como se menciona en (McBride et al., 2011) existirán quienes se enfoquen en la sostenibilidad de toda la cadena de suministro bioenergía, en cultivos bioenergéticos sostenibles, prácticas de manejo para diferentes ubicaciones, o en tratar de mejorar el sistema de producción de bioenergía y el procesamiento de materias primas.

En este trabajo se decidió utilizar los indicadores huella hídrica y huella de carbono para medir los impactos ambientales que podrían derivarse de la producción de bioetanol 2G teniendo como materia prima biomasa de *A. tequilana* Weber (var. azul), a continuación, se explica cada uno de ellos.

4.2. HUELLA HÍDRICA

En el proceso de producción de bioenergía, es imprescindible considerar la cantidad de agua que se requiere en las distintas etapas de manera directa e indirecta, ya que los recursos hídricos disponibles en el sitio donde se decida llevar a cabo la posible construcción de una biorrefinería es probable que se encuentren en niveles de estrés o de contaminación altos a causa de las

actividades antropogénicas y los efectos del cambio climático, situación que se ha reportado en muchas regiones de México y que se encuentra intrínsecamente relacionado con la producción de biocombustibles 2G, en este caso, bioetanol (Sacramento-Rivero et al., 2022; Hossain et al., 2021; CONAGUA, 2018).

Respecto a que la materia prima aquí considerada (bagazo de agave) proviene de un proceso industrial como lo es la producción de tequila, diversos estudios han estimado que para producir un litro de tequila a 40% de alc. vol. se necesitan 12 L de agua, además que dicha producción genera vinazas, un residuo importante con una composición química compleja que necesita tratamiento especial para cumplir con la normatividad en materia de calidad del agua vigente en nuestro país (Valenzuela, 2023).

Esta situación compete directamente al proceso de producción de biocombustibles 2G por el origen de la materia prima, ya que, en la visión de biorrefinería, se considera al agua como un insumo importante que será utilizado en el pretratamiento de la biomasa y en otras etapas asociadas a las transformaciones que esto involucra (Hossain et al., 2021; Sánchez et al., 2016). Por esta razón, conocer la cantidad de agua que dichos procesos requerirán, puede ser útil para la toma de decisiones respecto a las tecnologías del manejo de agua y acerca de los residuos derivados en toda la cadena de producción de bioenergía que puedan ser reintegrados o no al proceso (Popp et al., 2014).

En este sentido, desde que el concepto de huella hídrica (HH) se introdujo en 2002 es considerado un indicador relevante en la toma de decisiones respecto a estrategias para lograr una gestión adecuada del agua en diferentes procesos y servicios, desde agrícolas e industriales de diferente índole. De acuerdo con Champagain y Hoekstra (2004), la huella hídrica se refiere al volumen total de agua utilizada para producir los bienes y servicios consumidos por un individuo, por un grupo de personas o por un país, respectivamente. Algunas formas de reportar la HH son: el volumen de agua empleado en un determinado tiempo ($m^3/año$) y el volumen de agua por unidad de producto (m^3/ ton de producto) (Gerbens-Leenes *et al.*, 2012).

Para realizar el cálculo de la HH de un producto o proceso, es necesario tener datos como el volumen, color/clasificación del agua, de dónde proviene y en qué momento se extrae; aunado a esto, deben tomarse en cuenta factores locales para dar un contexto real y útil a dicho concepto; esto es, evaluar los impactos de la extracción del agua y su retorno como agua residual o tratada, su importancia ecológica de la zona, las condiciones de escasez o estrés hídrico de la región de análisis, los usos locales del agua y el acceso de la población al recurso (Hoekstra, 2003). Gerbens-Leenes *et al.*, (2012) mencionan que la cuantificación de la HH incluye la cuantificación del volumen del agua y del mapeo del uso de agua dulce. La HH se compone de tres elementos: a) agua azul que es el volumen del consumo de agua superficial y subterránea en el área de captación; b) agua verde, representa el agua de lluvia evaporada que no llega al desagüe y c) agua gris que es el agua contaminada y el agua de dilución empleada para restaurar espacios ambientales.

Dentro del concepto de huella hídrica se habla también de agua virtual, que se refiere únicamente a la cantidad total de agua requerida para obtener un producto, y se dice que es virtual porque no está presente en los productos finales (CONAGUA, s.f).

Sin embargo, el concepto de huella hídrica tiene una aplicación más amplia ya que es un indicador multidimensional que no solo se refiere al volumen de agua utilizado, ya que como se mencionó anteriormente, también hace explícito dónde se encuentra la huella hídrica, a qué fuente de agua se refiere y cuándo se utiliza el agua (Martínez- Arce et al., 2018).

Para su cálculo existen diferentes métodos entre los que se encuentra el marco para la evaluación de la huella hídrica propuesto por Hoekstra et al., (2011) este es el más usado en la estimación del consumo y calidad del agua en productos y procesos de distinta índole a lo largo de diferentes etapas de la cadena de suministro de recursos y/o producción. En dicho método, la HH se puede representar mediante un único impacto o un perfil, que aborde la escasez y/o disponibilidad del agua.

La Norma Internacional ISO 14046:2014 proporciona los principios, los requisitos y las directrices para realizar e informar de una evaluación de huella de agua única o individual, o como parte de una evaluación ambiental más integral, en esta se presenta un método en el que se mide el valor individual del impacto basándose en el análisis de ciclo de vida donde el resultado considera únicamente los impactos relacionados con la calidad del agua excluyendo a las emisiones al aire y suelo.

En el documento oficial se menciona que dicha ISO es modular, es decir, la HH de diferentes etapas del ciclo de vida pueden sumarse para representar el resultado total, además que es posible identificar el impacto ambiental potencial relacionado con el agua utilizada en procesos, productos o servicios.

Esta Norma Internacional proporciona los principios, requisitos y directrices para realizar e informar de una evaluación de huella de agua única o individual, o como parte de una evaluación ambiental más integral. En dicha ISO, el resultado de la evaluación de la HH se muestra como un valor individual o un perfil de los resultados del indicador del impacto. Sin embargo, si se requiere comunicar los resultados de la HH en forma de etiquetas o declaraciones, esto se encuentra fuera del campo de aplicación de esta ISO 14046:2014.

El método elegido para el cálculo de la HH de la etapa agrícola en este trabajo, fue una combinación de los cálculos planteados por Scarpate et al., (2016) y Renderos (2014), ya que se han empleado en el cultivo de la caña de azúcar y muestran características específicas de la etapa del desarrollo del cultivo y la asignación de impactos correspondiente a la biomasa que pueden adaptarse a las del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en los que se incluye la evapotranspiración del cultivo y el coeficiente único del cultivo, los cuales serán explicados en secciones posteriores. Respecto a la etapa industrial de la transformación de la biomasa en etanol, se toma como referencia los datos proporcionados por Sánchez et al, 2016 y Magaña-Mendoza, (2018).

4.3. HUELLA DE CARBONO

La Huella de Carbono (HC) se define como la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios que se expresan como equivalentes de CO₂ (Pandey et al., 2010; Wiedmann, 2009), en este sentido, es útil para cuantificar las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) derivadas de la producción agrícola del *Agave tequilana* Weber (var. azul) y la transformación de la biomasa residual (pencas y bagazo) de este agave en bioetanol.

Durante el cálculo de la huella de carbono se identifican todas las fuentes de emisiones de GEI y se obtiene un dato total de impacto de la actividad; lo anterior permite establecer medidas de reducción de energía basadas en un mejor conocimiento de los puntos críticos del proceso que se esté analizando (Hertwich *et al.*, 2009). Para determinar la HC total se deben cuantificar las emisiones directas e indirectas de CO₂, la primera a partir de la quema de combustibles fósiles, incluyendo el consumo doméstico de energía y transporte sobre los cuales tenemos control directo; mientras que la segunda es la medida de las emisiones indirectas de CO₂ de una parte o de todo el ciclo de vida de los productos que consumimos, es decir, los asociados con la manufactura y eventual descarte del producto en cuestión por ejemplo, la producción de la energía que consumimos en el autotransporte.

Actualmente, la huella de carbono es uno de los indicadores ambientales más utilizados para cuantificar impactos en la producción de biocombustibles, por lo que es importante mencionar que existen diferentes métodos para realizar la estimación de las emisiones asociadas a este indicador (Franca et al., 2021). Como se ha mencionado previamente, se busca que una de las características de los biocombustibles de materiales lignocelulósicos, sea que su producción contribuya con la disminución de las emisiones de GEI.

Sin embargo, para lograr que las emisiones asociadas a biocombustibles lignocelulósicos sea una realidad, es necesario evaluar diferentes materias primas bajo diversas circunstancias y sistemas donde existirán distintos métodos para el cálculo de las emisiones dependiendo del enfoque que se decida dar a cada caso de estudio ya que, como menciona (Thornley et al., 2015) los sistemas de bioenergía son complejos puesto que la misma bioenergía no es un proceso único, sino una cadena de suministro compleja donde cuestiones socioeconómicas influyen en su entorno (Ídem).

Por lo tanto, es importante que el impacto de la producción de bioenergía se evalúe de manera certera para asegurar que realmente son una opción para la reducción de emisiones a nivel local, regional y global (Thornley & Adams, 2017).

Entre las metodologías más utilizadas para la determinación de dichas emisiones se encuentran:

1. Las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) forma parte de las Naciones Unidas y es el órgano que se encarga de evaluar el conocimiento, generar y actualizar métodos de evaluación del impacto del cambio climático a nivel global. Esto para que se tenga una base científica disponible sobre opciones de adaptación y mitigación con referencia a las directrices sobre el cálculo de emisiones de Gases de Efecto invernadero que son importantes para la formulación de políticas públicas en diferentes escalas.

Desde 1988, el IPCC ha presentado cinco informes completos de evaluación dedicados a temas concretos. Entre las directrices hay volúmenes dedicados a actividades como son la energía, la industria, residuos y la agricultura donde se describen métodos más destacados para la estimación de emisiones de GEI como estimar siete GEI (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆ y NF₃) en todos los sectores de la economía: energía (incluido el transporte), fuentes industriales, agricultura, cambio de uso de suelo y silvicultura, y residuos.

2. Normas ISO (International Standard Organization)

Las Normas ISO tienen como función establecer criterios y métodos válidos a nivel internacional para lograr la calidad y garantía de servicios en empresas u organizaciones, estos también son aplicables a laboratorios certificados y procesos agrícolas e industriales, por mencionar algunos (Gao *et al.*, 2014; Holmatov *et al.*, 2019).

Como se señala en su página oficial, “ISO elabora documentos que apoyan la transformación del conocimiento científico en herramientas que ayudarán a abordar el cambio climático. Las iniciativas de GEI sobre mitigación se basan en la cuantificación, seguimiento, informe y verificación de emisiones y/o remociones de GEI” (ISO14067:2018).

En dicha Norma se sugieren actividades específicas a aplicar en el sistema evaluado destinadas a mejorar la gestión de GEI dentro del mismo, así como requisitos importantes para su evaluación que incluyen realizar inventarios, informes y auditorías necesarias para lograrlo. Otras Normas importantes son las ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 que proporcionan métodos a seguir para recopilar datos relacionados con análisis de ciclo de vida (ACV) que tienen relación con el cálculo de la huella de carbono. Un apartado fundamental para llevar a cabo dichos métodos, son los inventarios de categorías de GEI, los cuales, tal como se establece en las directrices del IPCC, se clasifican en directas e indirectas.

En este trabajo se evalúa la huella de carbono utilizando el método Nivel 1 y las directrices del IPCC vigentes, tomando como referencia el trabajo de Ali *et al.*, 2016 donde utilizan dicho método para determinar las emisiones del cultivo de trigo, en este caso se retoma para calcular las emisiones asociadas a la fase agrícola que involucra desde la plantación hasta la jima del *Agave tequilana* Weber (var. azul) en campo, cuya biomasa se utilizará posteriormente en la producción de bioetanol 2G.

Las ecuaciones, etapas y definición de escenarios tomadas en cuenta para este trabajo se encuentran en el apartado de metodología (enlace). Para tal fase, los GEI totales se calcularon primero con base en 1 ha de biomasa (kg CO₂ eq/ha) para posteriormente transformarse a la Unidad funcional de la etapa de transporte y transformación de la biomasa en etanol, es decir a MJ.

4.4. INDICADORES SOCIOECONÓMICOS

Los aspectos socioeconómicos de la bioenergía involucran indicadores sociales que, en principio, por su naturaleza cualitativa y subjetiva son difíciles de evaluar dado que comprenden la complejidad y diversidad de los problemas sociales del lugar donde se contemple realizar proyectos relacionados con el aprovechamiento y transformación de biomasa. Entre los factores a tomar en cuenta para estos indicadores, se encuentra la disponibilidad de datos de entrada para evaluar los indicadores sociales (Chazara et al., 2017).

Sin embargo, como se contempla en los marcos de sostenibilidad de la bioenergía, los métodos e indicadores socioeconómicos se basan en datos económicos relacionados con el valor agregado que podría darse a la biomasa, el número de empleos y el ingreso que tales representarían en beneficio del desarrollo económico de las regiones que opten por llevar a cabo proyectos relacionados con el aprovechamiento de bioenergía, pero también existen indicadores más relacionados con el bienestar social como tenencia de la tierra y daños ocupacionales, por mencionar algunos.

En cuanto al empleo, existen trabajos donde se realiza una subclasificación, por ejemplo, si son parciales, de tiempo completo, directos o indirectos, involucran además si la mano de obra requerida para realizarlos está calificada o no calificada como una medida del nivel de especialización que se requeriría para realizar ciertas tareas relacionadas con cada etapa de la cadena de valor de la bioenergía, desde la generación de la biomasa hasta la distribución del producto final (Pociovălișteanu et al., 2015; Chazara et al., 2017).

En este trabajo se abordaron de manera general los indicadores socioeconómicos de la producción de bioetanol 2G tomando en cuenta número de empleos, ingreso y rentabilidad.

4.5. NÚMERO DE EMPLEOS

Como puede observarse en los marcos para evaluar la sostenibilidad, entre los indicadores que destacan dentro del ámbito social se encuentra el número de empleos, esto debido a que ha sido ampliamente considerado en aspectos socioeconómicos (Dale *et al.*, 2013).

Lo anterior porque se considera que puede contribuir al desarrollo de áreas rurales y comunidades locales a través del establecimiento de nuevas oportunidades de empleo para los pobladores de dichas zonas. Por lo tanto, el número de empleos generados en una industria pueden proporcionar información sobre la contribución de la cadena de suministro de un determinado producto al desarrollo económico de la región de producción asociada (Siebert, 2016).

4.6. INGRESO

La creación de empleos y el desarrollo económico regional son considerados dos de los principales beneficios sociales que conllevaría la implementación de proyectos relacionados con biocombustibles (Domac *et al.*, 2005). Para los biocombustibles 2G, en términos de ingresos, el hecho de agregar valor a los residuos agrícolas o agroindustriales podría aumentar y diversificar los ingresos rurales mientras que se le da valor agregado al sector agrícola local.

Lo anterior puede propiciar el aumento de ingresos en diferentes partes de la cadena logística y de transformación en beneficio de diferentes actores; desde los agricultores que pueden beneficiarse de la venta de residuos primarios, mientras que los operadores de las plantas se podrán beneficiar de la naciente y posterior creciente demanda del procesamiento de residuos si la producción de biocombustibles 2G se concreta en el mediano plazo (FAO, 2003; Domac *et al.*, 2005; Kim y Dale, 2015). A largo plazo podría generarse un mayor flujo de dinero en las regiones que opten por esta alternativa, creando así más empleos indirectos e inducidos,

reforzando la inversión en otras áreas como acceso a servicios básicos e infraestructura (Domac *et al.*, 2005).

4.7. RENTABILIDAD

A pesar de todas las ventajas que implicaría la producción de biocombustibles 2G, aún existen barreras para su desarrollo comercial. Esto es, que las tecnologías aún representan altos costos económicos debido a que se encuentran en desarrollo, además que en algunos países las políticas que le den impulso a este nuevo mercado son inciertas.

El costo económico de producir biocombustibles 2G es mayor que el de producir combustibles fósiles (y también de biocombustibles 1G), y uno de los motivos más importantes es que los subsidios para producir energía proveniente de combustibles fósiles representan alrededor del 6.5% del Producto Interno Bruto a nivel mundial, creando así una desventaja en cuanto al precio actual de estos biocombustibles (FMI, 2015; IRENA, 2016.).

Por lo anterior, es importante considerar indicadores tales como la rentabilidad que den un panorama del costo que significa utilizar ciertas materias primas dentro de la cadena de valor de los biocombustibles 2G y, por lo que existen investigaciones que señalan la necesidad de no solo tomar el biocombustible como producto final, sino entrar en un esquema de biorrefinería donde se le daría valor agregado a otros productos provenientes de la transformación de la biomasa inicial (IRENA, 2016; Nizami *et al.*, 2017).

5. EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGAVE-TEQUILA

En el trabajo aquí desarrollado, es importante tener presente que a través de una actividad agrícola como la siembra del *A. tequilana* Weber (var. Azul), resulta posible visualizar una relación entre la naturaleza y la sociedad por el uso de la tierra, dado que el desarrollo de la agroindustria del *Agave tequilana* Weber (var. azul) implica actividades económicas y culturales que influyen positiva y negativamente en las personas involucradas en las labores de siembra, mantenimiento, cosecha, así como en el medio natural característico para el crecimiento del *A. tequilana* (agua, fauna, flora, minerales, relieve, clima, entre otros) y su transformación para la producción de tequila representativo del estado de Jalisco y de México a nivel mundial, el cual a lo largo de varias décadas se ha visto marcada por formas de vida, organización social y una lucha por consolidar, mantener y mejorar una agroindustria basada en la producción de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (Ochoa García, 2006; Fleskens *et al.*, 2009; Pérez, 2011).

5.1. EL SISTEMA PRODUCTIVO DE *Agave tequilana* Weber (var. azul)

Para abordar el sistema productivo del *Agave tequilana* Weber (var. azul), es conveniente mencionar algunos trabajos que han estudiado características de este cultivo, su crecimiento (extensiones de tierra dedicadas a su cultivo) e importancia socioeconómica en el contexto nacional tales como los de Íñiguez (2001); Valenzuela, (2003); García-Mendoza, (2007); Bowen y Valenzuela, (2009); Montañez *et al.*, (2011); Moya *et al.*, (2011); Núñez *et al.*, (2011); Valenzuela, (2011); Escamilla-Treviño, (2012); Valenzuela (2014); Sánchez-Soto, (2016). Partiendo de esta revisión, se plantea que el sistema productivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) se integra por la interrelación de cuatro factores: ambientales, económicos, socioculturales y de manejo.

Los aspectos ambientales se refieren a las características biofísicas que requiere la planta para su desarrollo, los de manejo a los requerimientos de los cultivos para obtener buenos rendimientos, mientras que los aspectos económicos tienen que ver con la reproducción de *A. tequilana* a gran escala, la cadena productiva y la logística de su comercialización. Finalmente los aspectos socioculturales se asocian al uso del producto económico y las dinámicas regionales, quiénes participan en la siembra, transformación y uso del *Agave tequilana* Weber (var. azul), entre otros.

5.1.1. FACTORES AMBIENTALES DEL *Agave tequilana* Weber (var. azul)

El Agave es un género de planta perenne, monocotiledónea que pertenece a la familia *Agavaceae*. Sus hojas están dispuestas en espiral y arregladas en rosetas en el ápice¹⁸ de un tallo, que puede medir hasta 3 m de altura. En general, sus hojas son suculentas, fibrosas, con la base dilatada y carnosas. La forma, número de hojas y dientes córneos (espinas) dependen de la especie de agave. Su tipo de metabolismo es ácido crasuláceo por lo cual tiene una transpiración nocturna, carbohidratos con una pérdida mínima de agua. Los agaves se reproducen de manera sexual mediante la polinización efectuada por algunos animales como murciélagos y colibríes, pero en la mayoría de las especies se propagan de manera asexual mediante plántulas.

El tiempo de crecimiento de la planta varía de 6 a 10 años antes de que las piñas (tallos) puedan ser seleccionadas y cosechadas individualmente dependiendo de su contenido de azúcares (>24% de sacarosa).

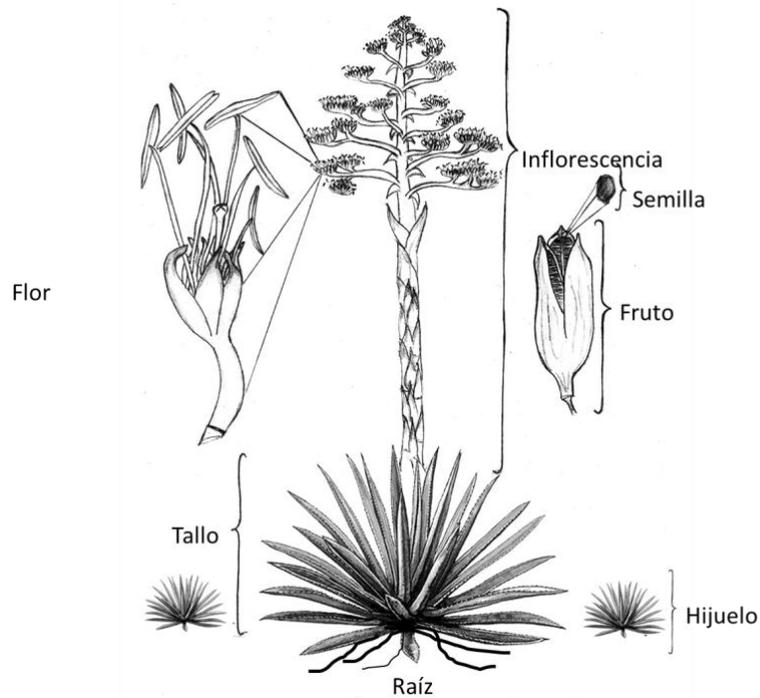


Figura 1. Principales características morfológicas del Agave tequilana Weber (var. azul). Modificado de Elvira Romano Grande (2007).

5.1.2. FACTORES DE MANEJO

Tradicionalmente la madurez industrial está asociada a la floración en los meses de febrero y marzo, por lo que es un cultivo multianual, no perenne. En diversas investigaciones se ha reportado que la plantación se realiza antes de la época de lluvias para que el “hijuelo” o plántula aproveche toda la humedad disponible; la jima (cosecha) se realiza durante todo el año. Entre el inicio y fin del ciclo de producción se realizan numerosas labores para mantener el crecimiento y buen desarrollo de la planta (deshierbes manuales, mecánicos y químicos, labranzas de suelo, nutrición, prevención y control de plagas y podas).

Durante el largo ciclo del agave, el suelo está descubierto, además el agave se planta en el sentido de la pendiente favoreciendo la erosión de los suelos. El cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) requiere de una mano de obra especializada en las labores y el uso de herramientas específicas, las cuales son resultado de una interrelación profunda entre los habitantes de la región y el cultivo (Valenzuela-Zapata, 2006).

El mantenimiento del cultivo requiere de vigilancia, para que la planta almacene jugos de azúcares sin infestaciones o plagas. La cosecha del agave está ligada a la floración, que se presenta cuando al centro de la planta emerge el brote del quiote o eje floral. La planta alcanza su madurez fisiológica cuando ha gastado toda su reserva de años en un periodo de diez meses. Es entonces cuando la “cabeza” o “piña” queda vacía de azúcares y humedad, y la planta muere.

Bajo cultivo se suprime la floración desde su inicio; por lo que la parte cosechable (piña) representa aproximadamente el 50% de la biomasa total, mientras que el resto son residuos principalmente de pencas que permanecen en el campo para incorporarse al suelo o quemarse. En la elaboración de bebidas alcohólicas, se utiliza únicamente la piña donde se concentran la mayor cantidad de azúcares, por lo cual se desechan las hojas que constituyen cerca del 45% en peso de la planta. Al final, el residuo de la piña (denominado bagazo) contiene celulosa (20-50 %), hemicelulosa (19%), lignina (15%) y azúcares solubles (5%).

5.1.3. FACTORES ECONÓMICOS

En el mercado nacional, la agroindustria del *Agave tequilana* Weber (var. azul) representa un sector importante desde hace varias décadas, principalmente en la producción de tequila, además, otras variantes de agave son importantes para la producción de destilados como mezcal¹⁷, bacanora, raicilla y fermentados como pulque.

La manera de cultivar agave en México ha cambiado a lo largo de las décadas, siendo el ejemplo más representativo el *A. tequilana* Weber (var. azul) en el Estado de Jalisco; su producción se

¹⁷ Donde el más producido es el *Agave angustifolia* o “espadín” aunque existen muchas otras especies silvestres como el *A. marmorata* o “tepeztate”, *A. karwinskii* o “madrecuishi”, *A. cupreata* o “maguey chino”, *A. papalometl* o “tobalá”, que pueden usarse para producir mezcal en muchas regiones de México. El *A. maximiliana* se utiliza principalmente en la producción de raicilla en el Estado de Jalisco y una variedad de *A. angustifolia* Haw. del norte del país (especialmente en Sonora) es la materia prima del Bacanora.

encuentra directamente relacionada con la elaboración de tequila la cual comenzó a tener relevancia a nivel nacional desde el porfiriato¹⁸ (Valenzuela-Zapata, 2003).

Hoy en día, las extensiones de cultivo dedicadas a la siembra de *Agave tequilana* Weber (var. azul) están sujetos a cuestiones económicas involucradas en la Denominación de Origen del Tequila (1974), en la cual se señala que este destilado puede producirse y comercializarse específicamente utilizando dicha especie de agave en la región de indicación geográfica¹⁹ que incluye a todo el estado de Jalisco, algunos municipios de Guanajuato, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas (Bowen, 2012). En ese aspecto, el *Agave tequilana* Weber (var. azul) es para la región de origen del tequila la principal fuente de ingresos, por lo cual, si ocurre una caída en su precio pueden vulnerarse las economías de los municipios pertenecientes a esa zona y el desarrollo rural de la región (Valenzuela-Zapata, 2003).

Sin embargo, a pesar de la existencia de esta normatividad, los ciclos de producción agrícola del agave se han presentado regularmente durante los últimos 50 años, esto es, primero se obtienen altos rendimientos de *A. tequilana* Weber (var. azul) seguidos de una sobreoferta y la correspondiente baja del precio de este cultivo, llegando al punto en que tales situaciones llevan a que no se estimule el establecimiento de nuevas plantaciones, provocando la falta de materia prima en ciclos futuros de cosecha (Valenzuela-Zapata, 2003; Boonman, 2009).

En este eje económico, se ha llegado a evidenciar que el cultivo de agave es un problema complejo y tiene distintas repercusiones tales como que en las regiones agaveras existe una baja diversificación de las actividades económicas y a una alta especialización en el cultivo, lo que deriva en el descuido de otras actividades económicas entre las que se encuentra la siembra de productos agrícolas como el maíz²⁰ (Martínez *et al.*, 2003; García y García, 2010).

¹⁸ Existen registros de 1900 y 1901 que señalan grandes niveles de producción de tequila (8,712,000 y 9,559,110 litros respectivamente).

¹⁹ Las indicaciones geográficas (IG) son nombres basados en lugares y transmiten el origen geográfico, así como como identidad cultural e histórica de los productos agrícolas. Las IG están protegidas por diversas instituciones y arreglos. En México, los productos basados en el lugar (p. ej. el tequila), están protegidos como denominaciones de origen.

²⁰ Entre 1999 y 2003, el cultivo de *Agave tequilana* Weber var. azul en el estado de Jalisco se expandió a áreas que anteriormente eran usadas para el cultivo de granos como el maíz.

Dentro del sistema agroindustrial del tequila, es importante mencionar que existen diferentes esquemas de tenencia de la tierra para la producción de agave y de manera general, hay dos tipos de productores: 1) agaveros que rentan sus predios y no realizan las actividades agrícolas; y, 2) los productores que cultivan agave en sus propias tierras y lo venden a productores de tequila (Herrera-Pérez & Juárez-Sánchez, 2011).

En trabajos como Salcido Ruíz *et al.*, (2016); Padilla Miranda, (2017); Sánchez Soto, (2017) se identifican tres tipos de contratos para producir agave en el municipio de Tequila, Jalisco: arrendamiento (renta), aparcería y mediería. En el arrendamiento coexisten dos modalidades: renta de tierras para plantar agave y propietarios de predios que rentan principalmente a industrias tequileras. La aparcería es un tipo de contrato informal donde la producción se distribuye en función a las aportaciones (predio, trabajo y capital) que realizan los socios contratantes. La mediería es un arreglo contractual informal menos frecuente, en donde el dueño de la tierra y el mediero aportan cantidades de recursos similares para cubrir los costos de producción del agave y las ganancias son repartidas en porcentajes iguales.

De esta manera, dependiendo del tipo de contrato, será la división del capital en la etapa agrícola de la producción de agave. Sin embargo, hay quienes contratan jornaleros para realizar los trabajos y su pago depende de las horas trabajadas y del costo del jornal.

También, en dichas referencias se menciona que dedicarse a la producción de agave como pequeño agricultor no es redituable económicamente y tampoco representa un área de oportunidades o la garantía de que los empleos puedan satisfacer más que las necesidades básicas de jornaleros y sus familias.

Además de los puntos antes mencionados, en últimos años la expansión del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) ha sido impulsado por la demanda de los consumidores de tequila en México y otras partes del mundo (Valenzuela-Zapata y Macías, 2014). Ante esto, ha habido una diversificación en la búsqueda de opciones que mejoren la agroindustria del *Agave tequilana* Weber (var. azul), dentro de éstas se incluyen la elaboración de mieles e inulina y la posible producción de biocombustibles de primera generación (Valenzuela-Zapata, 2011). En este

trabajo se explora el uso de los residuos biomásicos provenientes del cultivo y procesamiento del *Agave tequilana* Weber (var. azul) para su uso como materia prima para la producción de bioetanol 2G.

La industria tequilera, genera una gran cantidad de empleos en México, en el 2018 la Cámara Nacional de la Industria Tequilera (CNIT) reportó una generación de hasta 70 mil empleos directos en promedio, y durante el 1er semestre del 2019 reportó que la comercialización de tequila fue de 159 millones de litros, es decir que cada minuto, México exporta 400 L de tequila a 100 países distribuidos en todos los continentes, donde Estados Unidos su mayor cliente con compras de hasta 152.4 millones de litros (CNIT, 2017). Siguiendo esta línea, la expansión de la comercialización de tequila alimentará un mercado que cada vez demanda más producto.

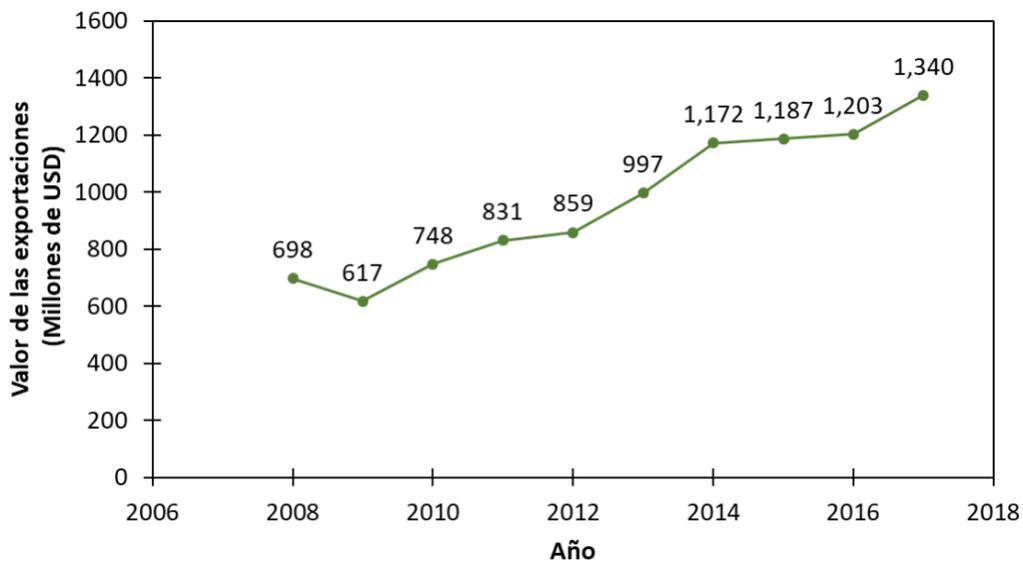


Figura 2. Evolución del valor de las exportaciones de tequila en millones de dólares desde 2008 hasta 2017. Elaboración propia con información del Atlas Agroalimentario (SIAP, 2018).

Entre las principales problemáticas que se han suscitado dada la apertura del mercado del tequila se encuentra la sobreoferta y escasez de agave, lo que ocurre aproximadamente de manera cíclica cada siete u ocho años, afectando el precio de la materia prima para la producción de tequila, ya sea que este tenga un precio muy alto o bajo de acuerdo con si se encuentra en período de escasez o sobre oferta llevando de esta manera a los tequileros a involucrarse en la

producción de materia prima bajo esquemas como siembra, compras a futuro, renta de predios, aparciamiento, mencionados previamente que no ha resultado tan beneficioso para los agaveros a lo largo de los años (CRT,2019). (Manual del Técnico Tequilero, CRT, 2019).

Tomando en cuenta este escenario de mayor producción de tequila, y los altibajos en los precios del agave ya mencionados, habría que considerar que en los próximos años (desde el punto de vista técnico) se generará una mayor cantidad de residuos susceptibles de ser transformados en etanol 2G tal como se plantea en este trabajo. Lo anterior podría contribuir en generar muchos más empleos e ingresos a este mercado que tal vez podría representar una estabilidad sobre todo a las pérdidas monetarias existentes en la comercialización de agave para tequila y valorizar los residuos provenientes de esta agroindustria.

5.1.4. FACTORES SOCIOCULTURALES

A grandes rasgos, el *Agave tequilana* Weber (var. azul) no solo representa la producción de tequila, sino una forma de vida y cultura que se refleja en distintas expresiones artísticas, culturales, académicas y sociales en torno a los elementos que componen la cadena productiva del agave-tequila (Olmedo-Carranza, 2014). Sin embargo, tal vez uno de los problemas principales es que los estudios realizados hasta ahora, a pesar de su importancia carecen de una integración de todos los aspectos que rodean a esta agroindustria. Hay muy poca investigación que incorpore la relación entre los problemas actuales con aspectos históricos de las grandes casas tequileras, los movimientos sociopolíticos que se han suscitado y hacia dónde puede dirigirse.

Quedan abiertas grandes incógnitas de cómo puede mejorar el sector y de esta forma asegurar la producción de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para tequila en las décadas por venir; aún más en este momento donde existe la posibilidad de incursionar en la producción de etanol 2G con los residuos generados dentro de la cadena productiva agave-tequila ¿cuáles serían los aspectos decisivos por tomar en cuenta si esto se convierte en una realidad?

6. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué tan sostenible es el uso de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. Azul) para la producción de bioetanol 2G?

6.1. HIPÓTESIS

El uso de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. Azul) para producir bioetanol 2G es más sostenible si se usan tanto residuos agrícolas (pencas) como residuos agroindustriales de la producción de tequila (bagazo), en comparación al uso exclusivo de bagazo. Por lo tanto, el bioetanol 2G producido en un esquema de biorrefinería con éstos residuos biomásicos tienen rendimientos similares, emisiones GEI y consumo de agua menores a los de la gasolina convencional.

7. OBJETIVOS

Objetivo general: Evaluar la sostenibilidad del uso de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para la producción de bioetanol 2G.

Objetivos específicos:

- 1) Seleccionar sitios de estudio con el mayor potencial teórico de generación de residuos de *Agave tequilana* Weber (var. azul).
- 2) Calcular la huella de carbono y huella hídrica del uso de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber var. Azul para la producción de bioetanol 2G.
- 3) Evaluar indicadores socioeconómicos (número de empleos, ingreso y rentabilidad) relacionados con la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *A. tequilana* Weber (var. azul).
- 4) Integrar los indicadores ambientales y socioeconómicos para evaluar la sostenibilidad del uso de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en la producción de bioetanol 2G.

8. METODOLOGÍA

El presente trabajo es un estudio prospectivo para determinar la sostenibilidad de la producción de bioetanol 2G a partir del uso de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. Azul). Esta biomasa consideró los residuos generados en campo (residuos agrícolas) y residuos generados en la producción industrial del tequila (residuos agroindustriales). El trabajo se dividió en tres fases: (1) delimitación del sistema y planteamiento de escenarios, (2) cálculo de indicadores ambientales, sociales y económicos para cada etapa, y (3) integración de indicadores (Figura 4).

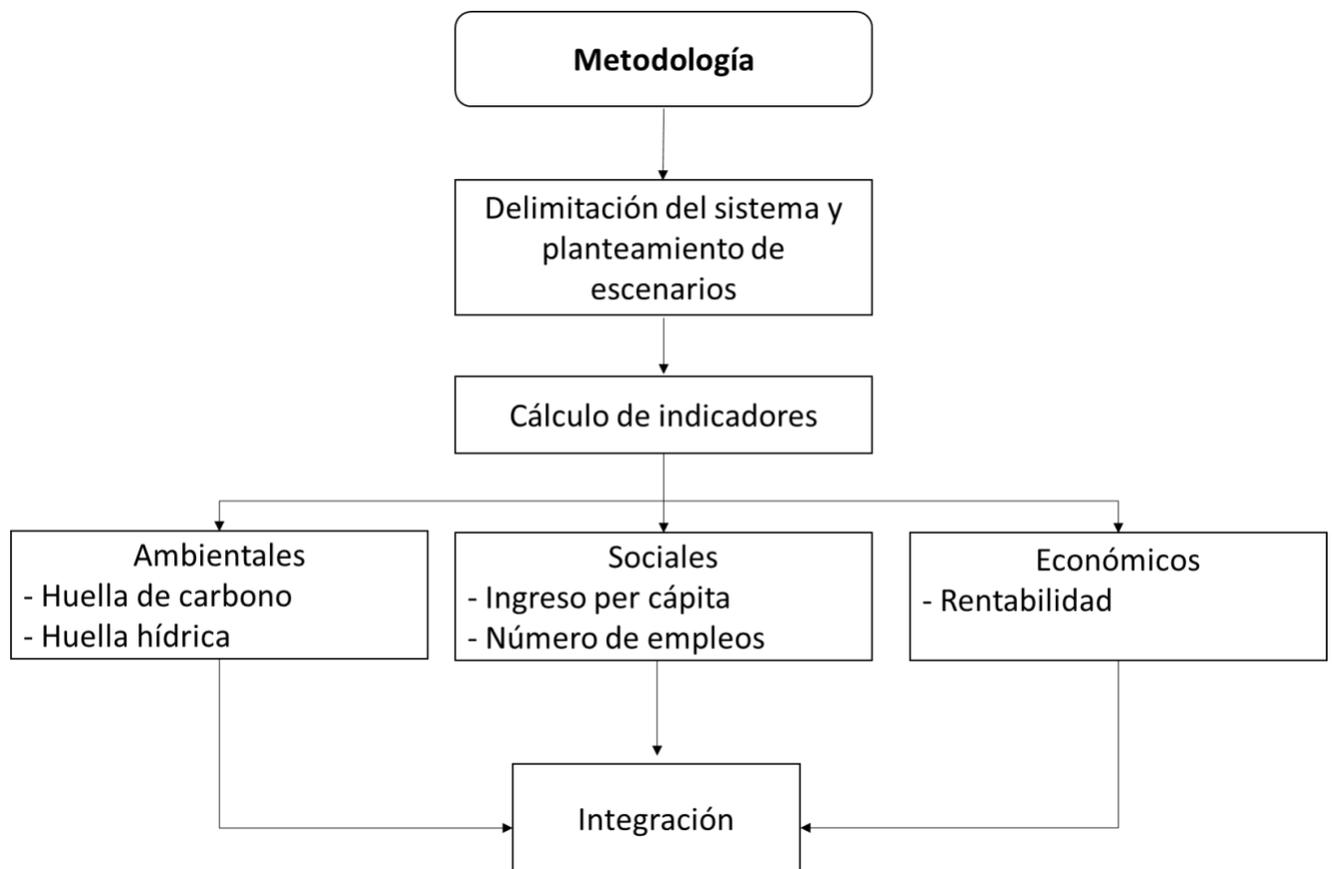


Figura 3. Metodología propuesta para determinar la sostenibilidad en la producción de biocombustibles a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. Azul). Elaboración propia.

8.1. DELIMITACIÓN DEL SISTEMA Y UNIDAD FUNCIONAL

8.1.1. EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL AGAVE TEQUILANA Weber (var. AZUL), TEQUILA Y LA GENERACIÓN DE RESIDUOS (CON ÉNFASIS EN PENCAS Y BAGAZO)

Como todo cultivo, la plantación de *Agave tequilana* Weber (var. azul) involucra una serie de pasos a seguir, enfocándonos en la fase agrícola, esta fase puede dividirse en 4 etapas: preparación del terreno, plantación, mantenimiento y jima de las piñas obtenidas para su posterior transformación en tequila (fase industrial).

En la preparación del terreno, se realizan distintas actividades donde resalta el uso de maquinaria para el subsoleo, arado y rastreo. Durante dicha etapa, quienes plantan agave se enfocan en el “desmonte” o limpia y el grado de mecanización de esta actividad depende de las condiciones del terreno (por ejemplo, si se encuentra en valle o pendiente), y se realiza únicamente durante el primer año para establecer la plantación. En la preparación del terreno se incluye surcar la tierra mecánicamente, lo que influye directamente en la cantidad de plantas por hectárea. En las entrevistas realizadas se encontró que la distancia entre plantas varía de 1 m a 3.5 m y la distancia entre surcos de 2.5m a 3.5 m, lo que permite tener de 3,000 a 4,000 plantas por hectárea.

En el establecimiento de las plantaciones de agave, es necesario realizar una desinfección de los hijuelos para evitar que sean invadidos por plagas como el picudo del agave, gallina ciega o el gusano barrenador los cuales provocan la pudrición de las piñas o evitan el óptimo desarrollo de la planta. Tales plagas son más peligrosas durante los tres primeros años de vida del cultivo, por este motivo, la desinfección de los hijuelos representa una mezcla importante de agroquímicos que incluye fungicidas, insecticidas y enraizadores tales como furadan, malathion o raizal. Otro inconveniente que busca ser controlado en las plantaciones de agave, son las malezas, por lo que, en complemento a estos compuestos químicos se utilizan herbicidas pre emergentes tales como el gramoxone o glifosato.

Durante el mantenimiento del cultivo, además del uso de fungicidas e insecticidas, es necesaria la aplicación de fertilizantes nitrogenados para que tengan una mayor disponibilidad de nutrientes, hay también quienes aplican una combinación de nutrientes tales como fósforo y azufre en forma de triple 16. Esta etapa también implica que los cultivos deben mantenerse alejados de maleza, por lo cual, a pesar de que hay agricultores que realizan limpiezas manuales, existen quienes emplean herbicidas pre emergentes y post emergentes (es decir, antes y después de la época de lluvias, respectivamente) para minimizar el brote de malezas además de realizar rastreos y cincheos para que la tierra permanezca suelta y las plantas tengan un adecuado crecimiento. Es importante mencionar que conforme la planta crece, la dosis de aplicación también aumenta, por ejemplo, hay quienes aplican de 60 a 80 g de fertilizantes durante el primer año de cultivo por planta, durante el segundo hasta 100g, hasta que durante el 5to año la dosis de fertilizante aplicada es de hasta 180g por planta. En otros casos hay quienes aplican, por ejemplo, hasta 300 kg de urea/año durante los primeros dos años para después cambiar el fertilizante a Triple 16 en la misma proporción. En la etapa de mantenimiento del cultivo, alrededor de los 3 años de plantado el agave, llega el brote de los hijuelos, lo cual requiere una labor de limpia manual y arranque para seleccionar los que formarán parte de nuevas plantaciones.

Finalmente, en la etapa de jima, el corte de pencas requiere un trabajo manual, aunque para el transporte de las piñas dependiendo del tipo de terreno (si está en pendiente o plano), se utilizan personas, camionetas o animales de carga para llevar las piñas al punto donde se colectan para trasladar a la tequilera en un transporte terrestre que consiste en camiones con 20 t de capacidad.

Luego de jimar las piñas, en campo se queda la biomasa de pencas como materia orgánica, y generalmente en la mayoría de los casos esta biomasa se quema para realizar la limpieza del terreno.

Ahora, durante la fase industrial, es decir, para el proceso de producción de tequila, la Norma Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2012 establece que:

“el tequila es una bebida alcohólica regional, obtenida por destilación y rectificación de mostos preparados directa y originalmente del material extraído, dentro de las instalaciones de la fábrica derivado de la molienda de las cabezas maduras del agave, previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, siendo susceptible de ser enriquecido por otros azúcares²¹ hasta en una proporción no mayor a 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa, en los términos establecidos en la norma y en la inteligencia de que no están permitidas las mezclas en frío. El tequila puede ser añadido de edulcorantes, colorantes, aromatizantes y/o saborizantes permitidos por la Secretaría de Salud, con objeto de proporcionar, intensificar su color, aroma y/o sabor”.

Además, la NOM señala que el tequila solo puede producirse legalmente en el territorio señalado en la Denominación de Origen: seis municipios de Nayarit, seis de Guanajuato, 29 de Michoacán, 11 de Tamaulipas y todo el estado de Jalisco.

Por lo tanto, para producir tequila es necesario coleccionar las piñas jimadas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (en la jima se generan una gran cantidad de biomasa residual correspondientes a las hojas o pencas), para llevarlas a la tequilera donde serán trituradas y cocidas, esto con la finalidad de hidrolizar los azúcares que posteriormente serán fermentados para la obtención del alcohol. La cocción de las piñas se realiza con calor de vapor en autoclaves con tiempos de cocción de 48 y 12 h respectivamente. Al terminar el cocimiento, las piñas se transportan en un molino donde se tritura con cuchillas giratorias y se lava con agua potable a presión para disolver los azúcares. Luego, entra en una prensa donde se extrae el jarabe o la miel, dejando atrás la fibra. La fibra o “bagazo”, es el primer residuo del proceso industrial. El presente estudio se centra en la etapa industrial de producción de tequila hasta esta etapa donde se genera dicho residuo.

A continuación, se realiza la fermentación donde los azúcares se convierten en alcoholes, y se forman otros compuestos tales como ésteres y aldehídos, se utilizan cepas de levadura

²¹ En la mayoría de los casos se usa azúcar de caña.

(comúnmente se usa *Saccharomyces cerevisiae*). El proceso se realiza en reactores de acero inoxidable agregando las cepas de levadura, sales de nitrógeno y fósforo a la miel (jarabe o también conocida como mosto) proveniente de la molienda. Durante el proceso se controlan principalmente la temperatura, pH y el tiempo de fermentación. El contenido de alcohol al final de esta etapa es del 4 al 6%.

Finalmente, para obtener el tequila es necesaria la etapa de destilación para separar el alcohol, agua y materia sólida obtenida en la fermentación mediante calor y presión. El resultado es un producto de mayor concentración de alcohol y vinazas, el proceso se realiza en alambiques de doble destilación (de cobre o acero inoxidable)²². La primera destilación se conoce como destrozamiento y la segunda rectificación, en esta última se incrementa el porcentaje de alcohol y se eliminan productos indeseables en el tequila blanco.

Es importante mencionar que, debido a los volúmenes de producción industrial del tequila, el proceso es cada vez más especializado y algunas empresas tequileras (Bacardí & Cía., Casa Cuervo, Brown-Forman, entre otras) y marcas como Cuervo, Herradura, Sauza, Corralejo, el Jimador (por mencionar algunas) cuentan con el registro de calidad de la ISO 9000 (Valenzuela-Zapata, 2003; Pérez, 2011; CRT, 2017).

Durante la elaboración de tequila, y aunado a los grandes volúmenes de producción, un problema que se ha tratado de combatir es la contaminación y deterioro del medio ambiente generado por los residuos provenientes de este proceso, tales como el bagazo y vinazas²³.

El bagazo, como se mencionó anteriormente, resulta de exprimir las piñas cocidas de Agave tequilana Weber (var. azul) para extraer el azúcar que procederá a fermentarse; este residuo se ha utilizado como parte del alimento para ganado y para fertilizar la tierra. Sin embargo, poco se hace con él y con frecuencia se queda amontonado sin oficio ni beneficio puesto que, sin un tratamiento previo su digestibilidad para el ganado y su eficiencia como abono son muy bajas. Lo

²² El alambique consta de tres partes: la caldera (donde se deposita el mosto), la columna (recoge y conduce el vapor), y el serpentín (donde el vapor se enfría y condensa).

²³ Residuos líquidos producto de la destilación del tequila, que tienen un alto potencial para generación de biocombustibles gaseosos (Buitrón y Carvajal, 2010; Sánchez *et al.*, 2016). Este proyecto se enfoca en los residuos sólidos lignocelulósicos (pencas y bagazo).

mismo sucede con las pencas del *Agave tequilana* Weber (var. azul) que podrían tener el mismo uso (Muriá, 2015).

8.1.2. EL USO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE *Agave tequilana* Weber (var. azul) PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL 2G

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se pretende abordar el uso de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para la producción de bioenergía, específicamente etanol 2G, por lo cual es necesario definir el sistema que se abordará. Como se muestra en la Figura 3, la producción de bioetanol 2G se divide en dos componentes principales: la generación de biomasa (fase agrícola) y la transformación de esta en etanol (fase industrial).

En el primero, se abarca la parte agrícola de la producción de *Agave tequilana* Weber (var. azul) y algunas etapas de la producción de tequila (hasta la producción de bagazo), debido a que durante estas se genera una gran cantidad de biomasa residual como son las pencas provenientes de la jima de las piñas, y el bagazo de la producción del tequila.

En el segundo, se considera la transformación de los azúcares contenidos en la biomasa generada en etanol 2G para su posterior uso en el sector autotransporte. A lo largo de estos también se involucra la fuerza de trabajo necesaria para realizar las labores agrícolas e industriales requeridas en la producción del cultivo y la conversión de la biomasa en etanol.

La producción agrícola actual de la que se deriva el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) tiene como insumos fertilizantes, pesticidas, energía, agua y mano de obra y a lo largo de ese ciclo genera emisiones y residuos (entre estos, biomasa). Es necesario cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de agua, la generación de empleos, los ingresos que dichos empleos generan, así como la rentabilidad de producir etanol a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para saber en qué medida el uso de esta biomasa como materia prima representa una opción viable para la producción de bioetanol 2G.

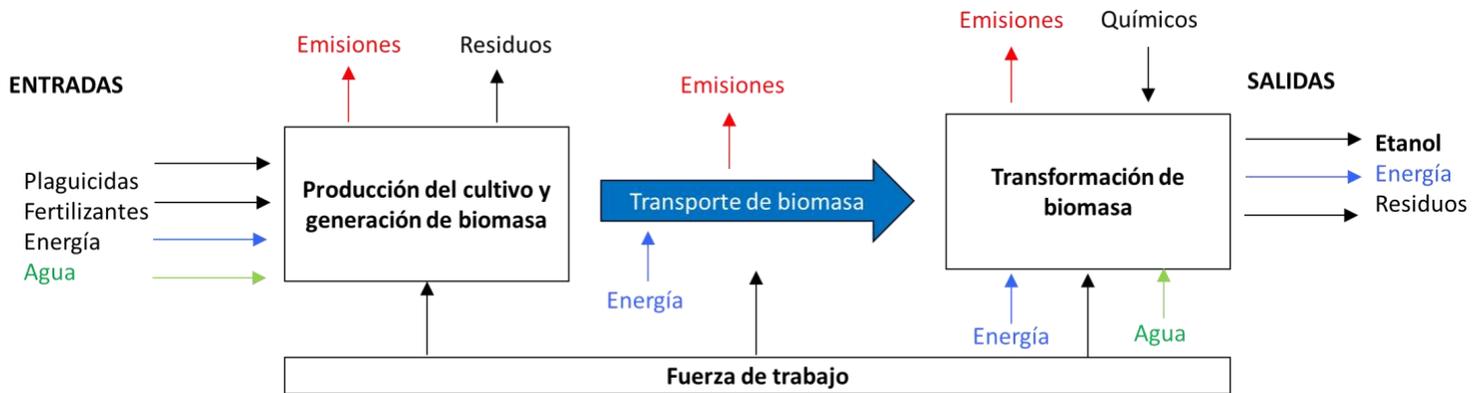


Figura 4. Sistema de producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual. Basado en Valdez-Vazquez et al., 2017.

El sistema considerado para la producción de bioetanol 2G toma en cuenta las etapas de generación de biomasa, transporte y la transformación de biomasa en etanol (Figura 5).

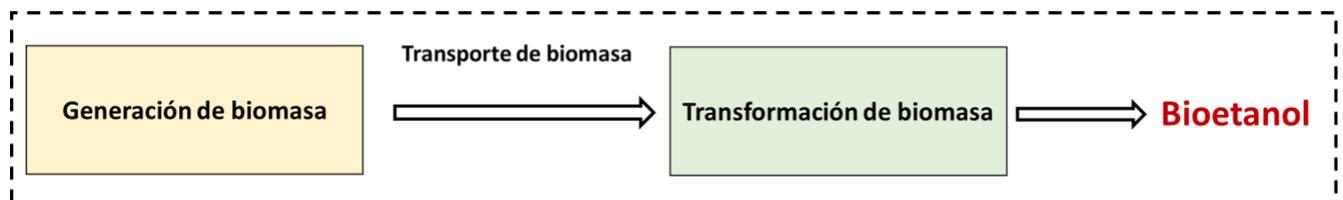


Figura 5. Límites del sistema de estudio enfocado a la producción de bioetanol 2G. Elaboración propia.

8.1.3. ETAPA DE GENERACIÓN DE BIOMASA

La etapa de generación de biomasa del sistema agave-tequila considera el cultivo de agave que comprende desde la preparación del terreno hasta la jima de las piñas en campo, el transporte de piñas a la tequilera donde sirven de materia prima para la elaboración del tequila, hasta los procesos donde se genera el bagazo como residuo agroindustrial (Figura 6). La entrada de insumos en esta etapa se representan por los combustibles en la maquinaria, fertilizantes, pesticidas y agua de lluvia además de la mano de obra que el cultivo de *A. tequilana* Weber (var. azul) requiere para su desarrollo.

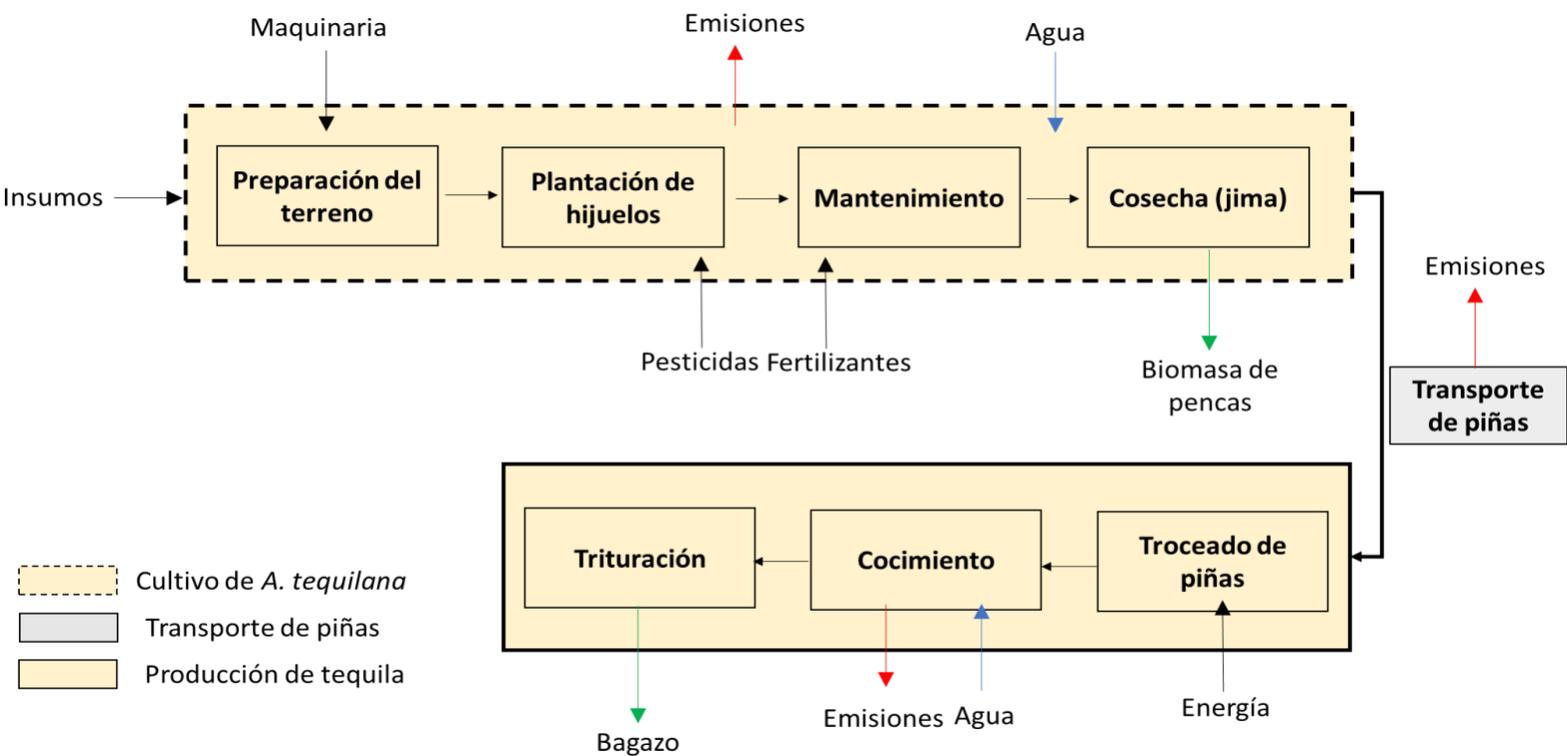


Figura 6. Etapa de generación de biomasa residual (hojas y bagazo) del sistema agave-tequila. En la figura, los pesticidas y fertilizantes tienen la externalidad de contaminar suelos y agua. Elaboración propia.

8.1.4. TRANSPORTE DE BIOMASA

Bajo el esquema actual de producción de tequila, dentro de la zona de Denominación de Origen se sabe que el 30% de este destilado se produce en la región Valles de Jalisco²⁴, siendo la región donde más se produce esta bebida. Dicha región comprende los municipios El Arenal, Amatitán y Tequila. Por lo tanto, para este trabajo se propone la localización de la biorrefinería en el municipio de Tequila (Figura 7) porque ahí se encuentran la mayoría de las tequileras de la Zona DOT incluyendo a las grandes destilerías de tequila como Tequila Sauza, Tequila La Cofradía y Tequila Orendain, por mencionar algunos (CRT, 2017), esto es, que en el municipio de Tequila se están generando la mayor cantidad de residuos de bagazo resultante de la producción de tequila.

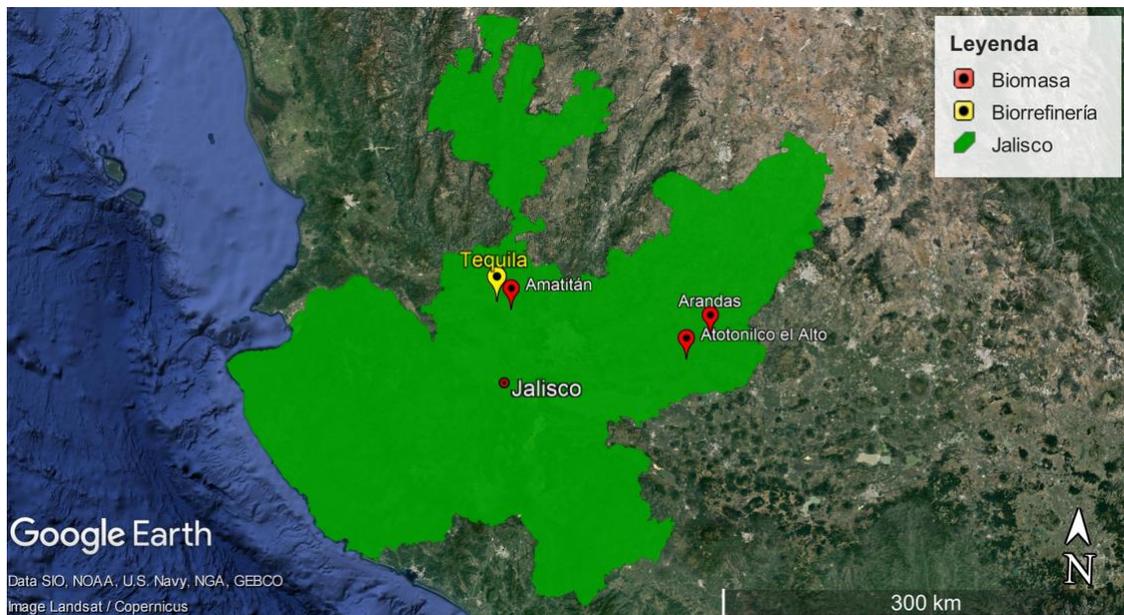


Figura 7. Ubicación teórica de la biorrefinería de etanol a partir de biomasa residual del sistema agave-tequila. Elaboración propia con datos de INEGI y SIAP.

²⁴ Ing. Crescenciano Velázquez, comunicación personal, 24 de mayo de 2018.

8.1.5. ETAPA DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA

La etapa de transformación de biomasa considera una biorrefinería de plataforma bioquímica propuesta por Sánchez et al. (2016). La biorrefinería considera la transformación de biomasa lignocelulósica (bagazo o bagazo/pencas) en etanol, electricidad y vapor (Figura 8). Es importante mencionar que, por el volumen de biomasa estimado del sistema agave-tequila generado en los sitios de estudio, la capacidad teórica de la biorrefinería planteada fue de 200 toneladas de biomasa base seca por día con un tiempo de operación anual de 330 días. Lo anterior es útil dado que ésta sería la configuración de la planta donde se estarían transformando los residuos de la producción de agave y tequila en etanol 2G.

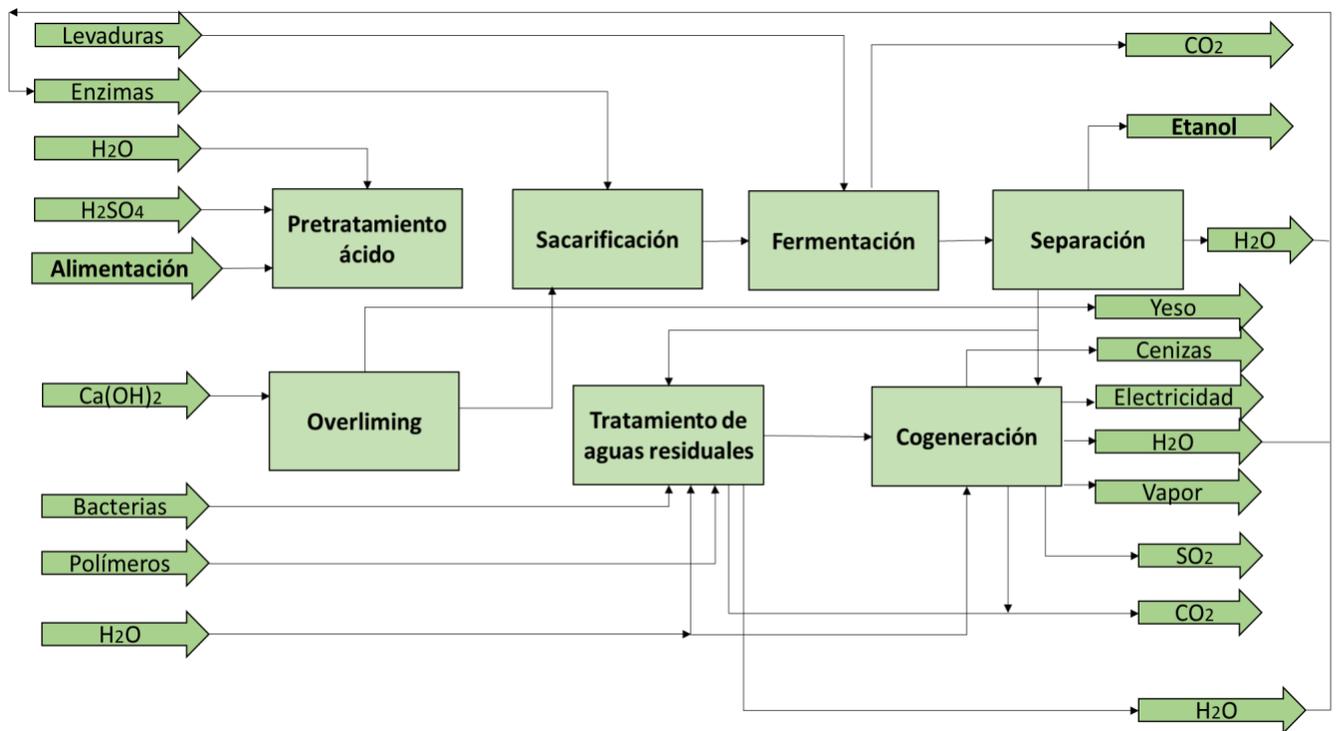


Figura 8. Diseño de la biorrefinería de plataforma bioquímica para producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica (Sánchez et al., 2016). Rendimiento de 10,459 MJ etanol/ ton biomasa.

8.1.6. UNIDAD FUNCIONAL

Debido a que el estudio donde se toma como referencia el proceso y los datos de la biorrefinería donde se realizaría la transformación de la biomasa en bioetanol se presentan en MJ de etanol/ton de biomasa (Sánchez *et al.*, 2016), la unidad funcional considerada en este estudio es 1 MJ de bioetanol generado.

8.1.7. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS

En este trabajo se optó por comparar dos escenarios de producción de etanol 2G, uno donde se toma en cuenta los residuos agrícolas y agroindustriales de la producción de tequila, y otro escenario donde se toma en cuenta únicamente los residuos agroindustriales. La finalidad es saber cuál de los dos es más sostenible respecto al tipo de biomasa que sería más viable de utilizar para su transformación en bioetanol de acuerdo con los indicadores antes descritos.

Escenario 1. Este escenario toma en cuenta únicamente el uso de bagazo generado en tequileras. Este bagazo será transportado a la biorrefinería para utilizarse como única como materia prima para la producción de bioetanol 2G (Figura 9).

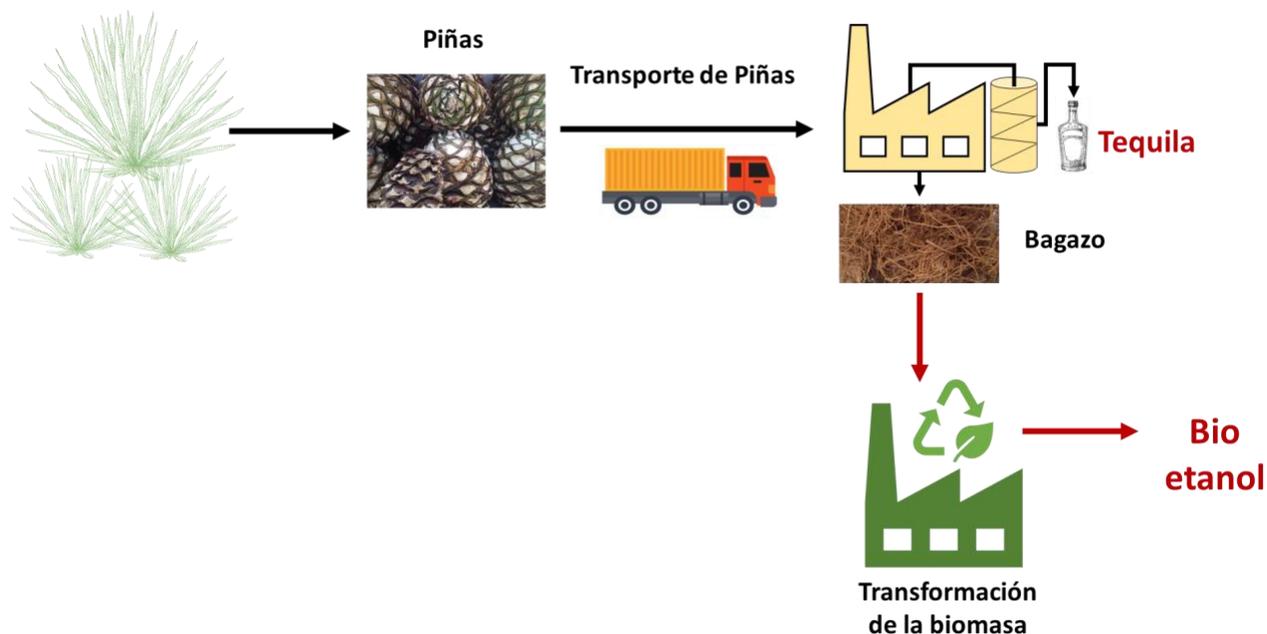


Figura 9. Escenario 1: uso exclusivo de bagazo de agave para la producción de bioetanol 2G. Elaboración propia.

Escenario 2. Este escenario toma en cuenta el uso de residuos de pencas (agrícolas) y bagazo (agroindustriales). Actualmente, los residuos de pencas provenientes de la jima del agave se queman en campo o son utilizadas como mejorador de suelos, en este escenario, para no intervenir de manera terminante en las prácticas agrícolas actuales, se consideró un uso del 70% de las pencas y el uso del 100% del bagazo generado en tequileras para la producción de etanol (Figura 10).

Se utilizó este porcentaje de pencas además porque se determinó en cálculos rápidos, que es el porcentaje con mejores rendimientos en la producción de etanol al combinar esta materia prima con bagazo.

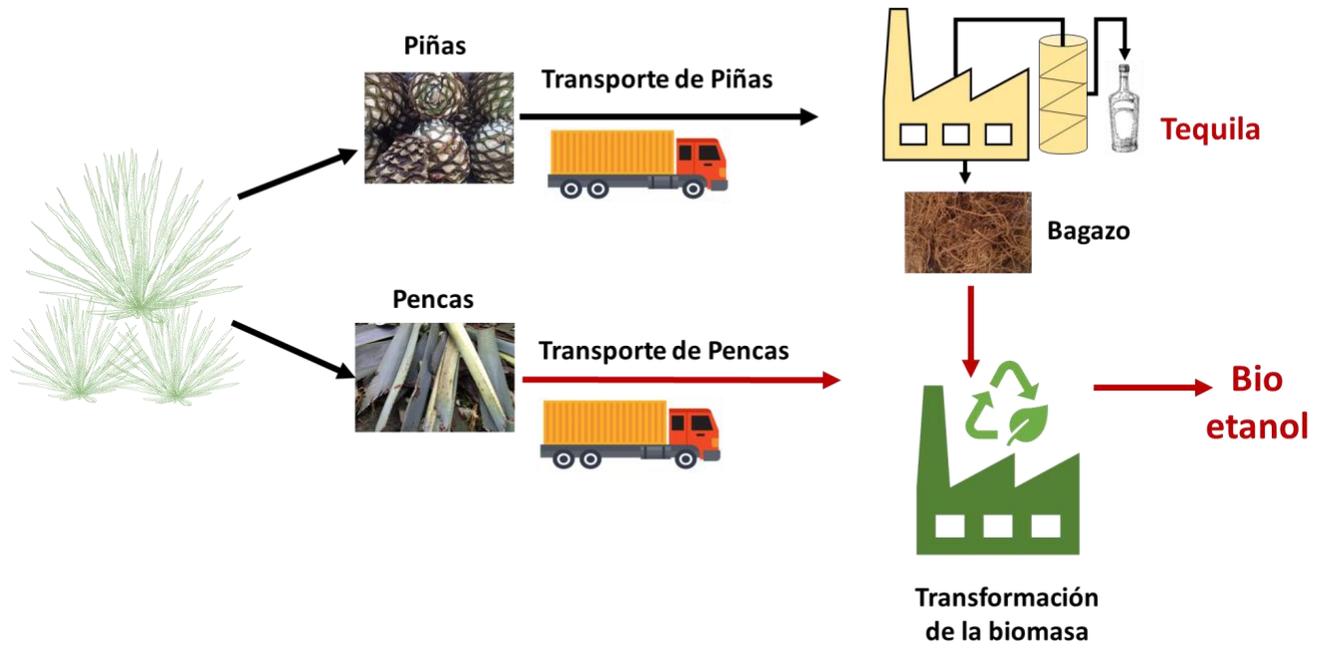


Figura 10. Escenario 2: uso de pencas y bagazo para la producción de bioetanol 2G. Elaboración propia.

8.2. CÁLCULO DE INDICADORES EN ETAPA DE GENERACIÓN DE BIOMASA

8.2.1. SITIOS DE ESTUDIO Y TAMAÑO DE MUESTRA

Como criterio de selección de los sitios de estudio, se consideraron aquellos municipios con un potencial teórico de biomasa residual igual o mayor a 165,000 toneladas de materia seca por año. Éste es el tamaño mínimo requerido para que una planta industrial de producción de bioetanol 2G sea rentable (Sánchez *et al.*, 2013). El potencial de biomasa residual se calculó con la siguiente ecuación:

$$BR = P_{cultivo} \times IR \quad \dots [1]$$

Donde:

BR biomasa residual $\left(\frac{t_{residuo}}{año}\right)$

$P_{cultivo}$ producción agrícola $\left(\frac{t_{cultivo}}{año}\right)$

IR índice de residuo $\left(\frac{t_{residuo}}{t_{cultivo}}\right)$

Los datos de la producción agrícola de *Agave tequilana* Weber (var. azul), se consultaron de la base de datos del Sistema de Producción Alimentaria y Pesquera (SIAP) a nivel municipal para los años 2010 a 2015 (SIAP, 2016). El valor del IR se tomó de la literatura con los datos mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Índice de residuo (IR) para la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul).

Tipo de biomasa residual	Índice de residuo ($t_{\text{residuo}}/t_{\text{cultivo}}$) ^a	Ref.
Pencas	0.12	Corbin <i>et al.</i> , 2015; Jiménez-Muñoz <i>et al.</i> , 2016
Bagazo	0.12	Valdez-Vazquez <i>et al.</i> , 2010

^a La tonelada de cultivo se refiere al peso total de la planta, es decir, pencas mas piña, mientras que la tonelada de residuo hace referencia a únicamente al peso de las pencas o del bagazo resultante de la piña.

Una vez identificados estos tres municipios como los sitios de estudio, se determinó el número de productores (tamaño de muestra) que sería necesario entrevistar para obtener la información necesaria para realizar el inventario de emisiones y los datos socioeconómicos útiles para indicadores sociales y económicos. El número de entrevistados se obtuvo utilizando la ecuación 2, tomando como tamaño de la población el total de productores en cada municipio seleccionado.

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 N p q}{e^2 (N-1) + Z_{\alpha}^2 p q} \quad \dots [2]$$

Donde:

- n Tamaño de la muestra (número de productores).
- N Tamaño de la población (número total de productores de agave en los tres municipios).
- Z α Es una constante que depende del nivel de confianza (%), indica la probabilidad de que los resultados de la investigación sean ciertos. El valor de Z α se obtiene de la tabla de distribución normal.
- E Es el error muestral deseado (%)
- p Proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio, este corresponde al número de productores en cada sitio de estudio (ver Tabla 12).
- Q proporción de individuos que NO poseen la característica de estudio, es decir 1-p.

El tamaño de muestra se estimó considerando un error de 10% y un nivel de confianza de 90%, por lo que el tamaño de muestra fue de 45 productores a entrevistar. Sin embargo, durante el trabajo de campo se realizaron 29 y en algunas no se obtuvo información concreta, por esto se recalculó un error del 10% y un nivel de confianza del 80%, con un número total de 17 entrevistas.

8.2.2. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RESIDUO (IR)

Se realizó trabajo de campo para determinar los valores específicos del IR ($t_{residuo}/t_{cultivo}$) de pencas y bagazo para los sitios de estudio seleccionados. El valor del IR depende de la variedad del cultivo (Rosillo-Calle *et al.*, 2007), prácticas agronómicas (Patterson *et al.*, 1995), y condiciones agroclimáticas (FAO, 2014). En la bibliografía, no se encontraron datos determinados en campo sobre el valor del IR para pencas y bagazo de agave en los sitios de estudio, haciendo necesaria su determinación. Los valores de IR encontrados en la literatura fueron esenciales para comparar el potencial de biomasa residual teórico (determinado con valores del IR promedio, Tabla 4) *versus* el potencial de biomasa residual real (determinado con valores del IR para cada sitio de estudio). Los valores del IR calculados en este estudio también sirvieron para la asignación de impactos en los indicadores ambientales (huella de carbono y huella hídrica).

En este trabajo se determinaron dos IR en campo: uno para las pencas y otro para el bagazo. Los valores de IR se determinaron como la relación entre la biomasa residual de pencas o bagazo en base seca dividida entre la producción del cultivo, de acuerdo con la Ec. 3:

$$IR = \frac{P_{residuo}}{P_{cultivo}} \quad \dots [3]$$

Donde:

IR índice de residuo $\left(\frac{t_{residuo}}{t_{cultivo}}\right)$.

$P_{residuo}$ Producción del residuo ($t_{residuo}$).

$P_{cultivo}$ Producción agrícola, piñas de agave ($t_{cultivo}$).

Para cada municipio, se hizo un muestreo aleatorio en campos de cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) durante los días 20 y 21 de octubre de 2017, donde el número de puntos de muestreo se determinó en función del tamaño del terreno de acuerdo con la norma NMX-AA-132-SCFI-2006 “Muestreo de suelos para la identificación y cuantificación de metales y metaloides, manejo de la muestra” (ver Tabla 4).

Tabla 4. Número de puntos de muestreo (resumen).

Superficie del terreno (ha)	Número mínimo de puntos de muestreo
1 – 1.99	12
2 – 2.99	14
4 – 4.99	18
6 – 6.99	20
8 – 8.99	22
14 – 15.99	26
20 – 21.99	29

Adaptado de la NMX-AA-132-SCFI-2006.

Para extensiones menores a 0.1 ha y mayores a 30 ha se debe usar la ecuación [4]

$$Y = X^{0.3} \times 11.71 \quad \dots [4]$$

Donde:

Y Es el número mínimo de puntos de muestreo.

X Es la superficie del terreno (ha).

En cada punto de muestreo se pesó una planta completa la cual se dividió en pencas y piñas (ver Figura 11). Cada porción se pesó por separado con ayuda de un dinamómetro con capacidad de 20 kg, registrando el peso húmedo. Para cada sitio de estudio, se tomó una muestra compuesta para determinar su contenido de humedad en laboratorio de acuerdo con la norma ASABE S358.2 para forrajes (ASABE Standards, 2008).

También, se tomó una muestra compuesta de piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para obtener y determinar el peso seco del bagazo.

Las muestras compuestas de pencas y agave fueron almacenadas en bolsas cerradas herméticamente, y procesadas en un tiempo menor a 2 días.



Figura 11. Muestras de hojas y piñas tomadas en campo para calcular los índices de residuo (IR) de hojas y bagazo del cultivo de *A. tequilana* Weber (var. Azul). Morales García, 2017.

En el laboratorio, las piñas se secaron al sol durante 3 días y posteriormente en un horno convectivo a 60 °C durante 48 h. Posteriormente, las muestras de piñas secas se pusieron en matraces de 1 L y se llevó a ebullición con agua destilada durante 20 min, esto para simular el proceso de extracción de azúcares de la producción de tequila. El procedimiento se repitió 10 veces, los sólidos recuperados se secaron en una estufa a 80 °C durante 24 h. Para el procesamiento de las muestras compuestas de hojas, estas se secaron al sol durante 3 días y

luego en una estufa a 60 °C durante 48 h para eliminar la humedad de las muestras y se almacenaron en bolsas herméticas hasta su análisis bromatológico.

A continuación, se determinó el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de los residuos de hojas y de bagazo recuperados de las piñas de acuerdo con el método reportado por Van Soest *et al.*, (1991).

En cuanto al bagazo de las piñas provenientes de la producción de tequila, se tomaron muestras por triplicado al bagazo de diez diferentes tequileras ubicadas en los municipios de interés del Estado de Jalisco durante el mes de abril de 2018; dichas muestras se depositaron en bolsas herméticas para determinar el contenido de humedad por diferencia de peso utilizando la ecuación 5, estas fueron secadas en una estufa a 55 ± 1 °C por 72 h y se almacenaron en bolsas herméticas para análisis posteriores.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_h}{P_s} \times 100 \quad \dots [5]$$

Donde:

% Humedad Porcentaje de humedad de las muestras de bagazo de la producción de tequila (adimensional).

P_h Peso húmedo de la muestra de bagazo (g).

P_s Peso seco de la muestra de bagazo, después de 72 h en estufa (g).

8.2.3. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

Se realizó trabajo en campo para obtener los datos del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua en el sistema agave-tequila. Se realizaron entrevistas semi-estructuradas a productores de *Agave tequilana* Weber (var. azul) y productores de tequila. El cuestionario utilizado fue una adaptación del desarrollado por el Dr. Julio Sacramento Rivero de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) para maíz (ANEXO B). Se realizaron modificaciones de acuerdo con las necesidades del cultivo del *Agave tequilana* Weber (var. azul).

Para las entrevistas relacionadas con la generación de bagazo asociada a la producción de tequila, el cuestionario fue desarrollado en colaboración con el Dr. Héctor Núñez del Centro de Investigación y docencia Económicas (CIDE) (ANEXO C). Las entrevistas se realizaron los días del 17 al 27 de abril de 2018.

La determinación de la huella de carbono se realizó mediante el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) totales en las etapas de generación de biomasa, transporte y transformación de biomasa para cada uno de los escenarios planteados previamente (Ecuación 6). Inicialmente, para la etapa agrícola de la producción de agave se tomó como referencia el rendimiento de este cultivo en campo, los inventarios de emisiones de esta etapa se encuentran referenciados a hectáreas (ha) de agave y posteriormente, luego de la asignación de impactos se transformaron a MJ de bioetanol tomando en cuenta que únicamente la biomasa de este cultivo será usada en la producción de bioetanol 2G.

$$HC_{Total} = HC_{GB} + HC_{TB} + HC_{TrBE} \quad \dots [6]$$

Donde:

HC_{Total} Huella de carbono total de la producción de bioetanol 2G $\left(\frac{g CO_2 eq}{MJ bioetanol}\right)$.

HC_{GB} Huella de carbono de la generación de biomasa, que para el escenario 1 considera solo bagazo, y para el escenario 2 hojas y bagazo $\left(\frac{g CO_2 eq}{MJ bioetanol}\right)$.

HC_{TB} Huella de carbono del transporte de la biomasa a la biorrefinería $\left(\frac{g CO_2 eq}{MJ bioetanol}\right)$.

HC_{TrBE} Huella de carbono de la transformación de biomasa en bioetanol $\left(\frac{g CO_2 eq}{MJ bioetanol}\right)$.

En la etapa de generación de biomasa, el inventario de GEI correspondiente al cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) se calculó tomando los lineamientos reportados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático utilizando los factores de emisión nivel 1 (IPCC, 2019), considerando la metodología y ecuaciones reportadas por Ali *et al.* (2017), empleadas para el cultivo de trigo duro italiano (*Italian durum wheat*) adaptándolas para calcular las emisiones del cultivo de agave.

Las emisiones contabilizadas fueron las ocasionadas o acumuladas directa o indirectamente durante el cultivo de una hectárea de *Agave tequilana* Weber (var. azul) del ciclo comprendido entre mayo 2012 – abril 2018. Se tomaron en cuenta las emisiones por uso de fertilizantes, residuos del cultivo, uso de plaguicidas, uso de maquinaria agrícola, aplicación de cal y emisiones por quema de residuos.

Por lo tanto, para el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul), el total de las emisiones de gases de efecto invernadero se calculó con la ecuación 7.

$$\Sigma GEI_{Cultivo} = ED_{N_2O} + EI_{N_2O} + EQR + EUP + EAC + EUM \quad \dots [7]$$

Donde:

$\Sigma GEI_{Cultivo}$ Emisiones totales de gases de efecto invernadero del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

ED_{N_2O} Emisiones directas de óxido nitroso $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

EI_{N_2O} Emisiones indirectas de óxido nitroso $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

EQR Emisiones por quema de residuos $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

EUP Emisiones por uso de plaguicidas $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

EAC Emisiones por aplicación de cal $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

EUM Emisiones por uso de maquinaria $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

Las emisiones directas de N_2O ($kg\ CO_2\ eq/ha$) son las resultantes de la dosis de aplicación de fertilizantes nitrogenados al cultivo y el nitrógeno en suelo debido a la desnitrificación de los residuos dejados en campo, dichas emisiones se determinan usando la ecuación [8]

$$ED_{N_2O} = N_2O_{Fertilizantes} + N_2O_{Residuos\ del\ cultivo} + N_2O_{N-fijación\ de\ cultivos} \dots [8]$$

El término para calcular las emisiones por la aplicación de fertilizantes nitrogenados se muestra en la ecuación 9.

$$N_2O_{Fertilizantes} = NA \times (Frac_{GASF}) \times FE_1 \times \frac{44}{28} \times PCG_{N_2O} \quad \dots [9]$$

Donde:

NA Nitrógeno aplicado $\left(\frac{kg\ N}{ha \times año}\right)$

Frac_{GASF} Fracción del total de N aplicado al suelo que es emitido como $NO_x + NH_3 \left(\frac{kg\ N}{kg\ N}\right)$, se asume que es 0.11/ kg de fertilizante N aplicado (IPCC, 2019).

FE₁ Factor de emisiones de N₂O ocasionadas por la aplicación de N (incluyendo los residuos agrícolas) a los suelos. De acuerdo con el IPCC Nivel 1 corresponde a 0.01 $\left(\frac{kg\ N_2O}{kg\ N}\right)$

44/28 Factor para convertir N₂ a N₂O

PCG_{N₂O} Potencial de calentamiento global del N₂O $\left(\frac{298\ N_2O}{CO_2}\right)$

Las emisiones directas debidas a los residuos agrícolas dejados en campo se obtienen mediante la ecuación [10]. Para el caso específico del *Agave tequilana* Weber (var. azul), los residuos que se quedan en campo son las pencas, por lo tanto, los términos correspondientes a residuos se refieren a ellas (índice de residuos, peso seco y contenido de nitrógeno).

$$N_2O_{residuos\ de\ cultivo} = Y \times IR \times ST_{hojas} \times CN_{hojas} \times FE_1 \times \frac{44}{28} \times PCG_{N_2O} \quad \dots [10]$$

Donde:

Y Rendimiento de piñas *Agave tequilana* Weber (var. azul), para cada sitio de estudio $\left(\frac{kg}{ha}\right)$.

IR Índice de residuos de hojas de *A. tequilana* Weber (var. azul) en cada sitio de estudio calculado según la sección 9.3.1.

ST_{hojas} Contenido de sólidos totales (ST) de las hojas dejadas en campo, determinado como 5% m/m de ST.

CN_{hojas} Concentración de nitrógeno en residuos de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en base seca, reportado por González *et al.* (2005) como 53%.

FE_1 Factor de emisión de N_2O ocasionada por la aplicación de nitrógeno (incluyendo los residuos agrícolas) a los suelos, $0.01 \left(\frac{kg N_2O}{kg N} \right)$ nivel 1 (IPCC, 2006; IPCC 2019).

44/28 Factor para convertir N_2 a N_2O .

PCG_{N_2O} Potencial de calentamiento global del N_2O $\left(\frac{298 N_2O}{CO_2} \right)$.

El término $N_2O_{N-fijación de cultivos}$ no aplica para el cultivo de agave, ya que éste no es un cultivo fijador de nitrógeno.

Las emisiones indirectas del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) corresponden a la pérdida de nitrógeno aplicado al suelo por medio de volatilización y/o lixiviación, para lo cual se utilizaron las ecuaciones 11, 12 y 13:

$$EI = N_2O_{lixiviado} + N_2O_{volatilizado} \times \frac{44}{28} \times PCG_{N_2O} \quad \dots [11]$$

Donde:

EI Emisiones indirectas en $\left(\frac{kg CO_2eq}{ha} \right)$.

Los valores del nitrógeno volatilizado y lixiviado se obtuvieron de:

$$N_2O_{volatilizado} = NA \times Frac_{GASF} \times EF_4 \quad \dots [12]$$

$$N_2O_{lixiviado} = NA \times Frac_{lixiv} \times EF_5 \quad \dots [13]$$

Donde:

NA Es la concentración de nitrógeno aplicado al suelo $\left(\frac{kg\ N}{ha \cdot año}\right)$.

Fra_{CGASF} Fracción de volatilización, 0.11 (IPCC Nivel 1, 2019).

Fra_{Clxiv} Fracción lixiviada, 0.3 (Rochette *et al.*, 2008).

EF₄ Factor de emisión para volatilización $0.01 \left(\frac{kg\ N_2O-N}{kg\ NH_3-N+NO_X-N_{vol}}\right)$
(IPCC Nivel 1, 2006).

EF₅ Factor de emisión para lixiviación $0.011 \left(\frac{kg\ N_2O-N}{kg\ N}\right)$ (IPCC Nivel 1, Directrices 2006 y refinamiento 2019).

En los predios donde se lleva a cabo la quema de residuos dentro de las prácticas agrícolas del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul)²⁵, se utilizó la ecuación 14 para conocer su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero en kg CO₂ eq/ha.

$$E_{quemada} = A \times M_B \times F_{comb} \times FE_{msq} \times 10^{-3} \quad \dots [14]$$

Donde:

E_{quemada} Cantidad de emisiones de cada uno de los gases GEI resultantes de la quema (CO, CH₄, N₂O, NO_x, CO₂) en kg CO₂ eq. (IPCC 2006, para el refinamiento del 2019 no hay cambio en estos valores).

A Área de cultivo quemado (ha).

M_B Masa del combustible disponible para la combustión, es decir, residuos disponibles para la quema $\left(\frac{kg}{ha}\right)$ esto se calculó multiplicando el rendimiento de piñas de agave por el IR de pencas en peso fresco, por el contenido de sólidos totales (0.05) (ecuación 14.1).

²⁵ El manejo de residuos generados durante la jima de agave se consideró en la guía de preguntas realizadas en campo (ANEXO B). Antes de ir a campo se tenía conocimiento por lo reportado en literatura, que se realiza la quema de las pencas como actividad regular, por lo que se consideró esta variable en el cálculo de las emisiones de GEI.

$$M_B = Y_{Piñas\ pf} \times IR \times ST_{hojas} \quad \dots [14.1]$$

Donde:

F_{comb} Factor de combustión (adimensional). Se tomó un valor de 0.8 reportado para bagazo de caña de azúcar, nivel 1 (IPCC, 2006), debido a que no encontró un valor para *Agave tequilana* Weber (var. azul).

FE_{msq} Factor de emisión de materia seca quemada ($\frac{g}{kg}$), nivel 1 para cada GEI (Tabla 7; IPCC, 2006, para el refinamiento del 2019 no hay cambio en estos valores).

10^{-3} Factor para convertir toneladas a kg.

Para convertir los kg de cada gas GEI a kg CO₂eq, se multiplicó por su respectivo valor de potencial de calentamiento global (PCG₁₀₀; Tabla 5).

Tabla 5. Factores de emisión de materia seca quemada y potenciales de calentamiento global (PCG) de los principales gases de efecto invernadero generados en la quema de biomasa (Minx et al., 2021; IPCC, 2019; Myhre et al., 2013; IPCC, 2006).

Gas GEI	$FE_{msq} \left(\frac{g}{kg} \right)$	$PCG_{100} \left(\frac{GEI}{CO_2} \right)$
CH ₄	2.7	28 (biogénico) ^a
CO	92	1.8 ^b
N ₂ O	0.07	265
NO _x	2.5	298
CO ₂	1515	1

^a Minx, J., Lamb, W., Andrew, R., Canadell, J.G., Crippa, M., Döbbeling, N., Forster, P., Guizzardi, D., Olivier, J., Peters, G., Pongratz, J., Reisinger, A., Rigby, M., Saunio, M., Smith, S.J., Solazzo, E. and Tian, H., A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019, EARTH SYSTEM SCIENCE DATA, ISSN 1866-3508, Volume 13 (11), 2021, p. 5213-5252, JRC125851.

^b Valor obtenido de: Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.

Una vez determinadas las emisiones por quema de residuos, se realizó el cálculo de las emisiones por uso de plaguicidas término EUP de la ecuación 6, estas emisiones varían de acuerdo con el ingrediente activo de cada plaguicida y su tasa de aplicación (ecuación 15). El factor de emisión de la producción, embalaje, almacenamiento y transporte para cada plaguicida se tomó de Lal, (2004) y está reportado como carbono equivalente (CE; kg CE/kg de plaguicida aplicado), los valores utilizados se encuentran en la Tabla 6.

$$EUP = FE \times TA \quad \dots [15]$$

Donde:

EUP Emisiones por uso de plaguicidas $\left(\frac{kg\ CO_2}{ha}\right)$.

FE Es el factor de emisión para el plaguicida en cuestión, Tabla 6 $\left(\frac{kg\ CE}{kg\ aplicado}\right)$.

TA Es la tasa de aplicación del plaguicida en cuestión $\left(\frac{kg\ aplicado}{ha}\right)$.

Tabla 6. Factores de emisión para plaguicidas en la etapa agrícola de la producción de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (Lal, 2004).

Plaguicida	Factor de emisión (kg CE/kg aplicado)
Herbicidas	6.3
Insecticidas	5.1
Fungicidas	3.9

En el cultivo del *Agave tequilana* Weber (var. azul), en ocasiones se aplica carbonato de calcio agrícola (cal) para regular el pH de los suelos donde se establece la plantación (CRT, 2011). En los casos donde se realiza esta práctica²⁶, se tomaron en cuenta las emisiones de CO₂ por uso de cal, para calcular tales emisiones se utilizó la ecuación 16.

$$EAC = (TAC \times FE_{cal}) \times \frac{44}{12} \quad \dots [16]$$

Donde:

EAC Emisiones por aplicación de cal $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

TAC Tasa de aplicación de cal $\left(\frac{t}{año}\right)$.

FE_{cal} Factor de emisión de la piedra caliza, 0.13 (ton Carbono), nivel 1 (IPCC, 2006, el valor permanece igual en el refinamiento del 2019).

$\frac{44}{12}$ Factor para convertir las emisiones de carbono en emisiones de CO₂.

Para calcular las emisiones de GEI generadas por uso de maquinaria se utilizó la ecuación [17]:

$$EUM = ECE \times CC \times OTP \times TPC \quad \dots [17]$$

Donde:

ECE Emisiones de carbono equivalentes para las operaciones en campo, valor promedio de emisiones para diésel mexicano de 2.596 $\left(\frac{kg\ CO_2}{L}\right)$ (INECC, 2014).

CC Consumo de combustible para cada operación en el campo $\left(\frac{L}{ha}\right)$.

OTP Número de veces en las que se realizó una actividad (adimensional).

TPC Tasa de producción del combustible reportado como 1.24 (Ali *et al.*, 2017).

²⁶ De acuerdo con la información obtenida en campo (entrevistas), hubo quienes señalaron esta práctica como algo recurrente.

Al contar con el total de emisiones GEI provenientes de las emisiones directas, indirectas, uso de plaguicidas, quema de biomasa, aplicación de cal y uso de maquinaria para cada una de estas etapas, se calculó la huella de carbono del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (Ecuación 18).

$$HC_p = \frac{\sum GEI_{cultivo}}{Y_p} \quad \dots [18]$$

Donde:

HC_p Huella de carbono de cada producto del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul), piñas o pencas según corresponda $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{t}\right)$.

$\sum GEI_{cultivo}$ Gases de efecto invernadero totales del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul), ecuación 6 $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{ha}\right)$.

Y_p Rendimiento de producto, piñas o pencas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) según corresponda $\left(\frac{t}{ha}\right)$.

Para conocer la huella de carbono de las piñas y la biomasa de agave correspondiente a pencas, se realizó una asignación de impactos tomando en cuenta la fracción másica y la fracción de valor de los subproductos de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (ecuación 19, Scholten, 2009; Mathioudakis *et al.*, 2017). Los resultados de dicha asignación se encuentran en el ANEXO D.

$$FAI = \frac{fm \times fv}{\sum(fm \times fv)} \quad \dots [19]$$

Donde:

FAI Factor de asignación de impactos (adimensional).

F_m Fracción másica del producto (piñas o pencas), ecuación 19.1. Adimensional.

$$f_m = \frac{Y_p}{Y_T} \quad \dots [19.1]$$

Y_p Rendimiento del producto (piñas o pencas) $\left(\frac{t}{ha}\right)$.

Y_T Rendimiento total (piñas mas pencas) $\left(\frac{t}{ha}\right)$.

F_v Fracción de valor del producto (Ecuación 19.2). Adimensional.

$$f_v = \frac{C_p}{C_T} \quad \dots [19.2]$$

C_p Costo del producto (piñas o pencas) $\left(\frac{\$}{t}\right)$. Actualmente el costo de la tonelada de piña es de \$22,000, mientras que el de bagazo es de \$480²⁷.

C_T Costo total (piñas mas pencas) $\left(\frac{\$}{t}\right)$.

Por lo tanto, la huella de carbono de los subproductos del *Agave tequilana* Weber (var. azul) en $kg CO_2 eq/t$ se determinó utilizando la ecuación 20:

$$HC_{piñas,pencas} = HC_{cultivo} \times FAI \quad \dots [20]$$

Donde:

$HC_{piñas, pencas}$ Huella de carbono de piñas o pencas, según corresponda $\left(\frac{kg CO_2 eq}{t}\right)$.

FAI Factor de asignación de impactos (adimensional).

$HC_{cultivo}$ Huella de carbono del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul), ecuación 18, $\left(\frac{kg CO_2 eq}{t}\right)$.

$\Sigma GEI_{cultivo}$ Gases de efecto invernadero totales del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul), ecuación 6 $\left(\frac{kg CO_2 eq}{ha}\right)$.

$Y_{piñas, pencas}$ Rendimiento de piñas o pencas de agave, según corresponda $\left(\frac{t}{ha}\right)$.

La huella de carbono correspondiente al transporte de las piñas a la tequilera se calculó utilizando la ecuación [21]. En la Tabla 7 aparecen los datos utilizados en el cálculo de la huella de carbono del transporte de las piñas a una tequilera ubicada en el municipio de Tequila, Jalisco.

$$HC_{Tpiñas} = \frac{ECE \times CC \times OTP \times TPC}{C_{camión}} \quad \dots [21]$$

²⁷ Este dato se obtuvo en entrevistas durante el trabajo de campo, para el costo de la biomasa se tomó como base el reportado en Arellano-Hernández, 2018 para paja de trigo. Se debe tomar en cuenta que el costo de la tonelada de agave fluctua de forma constante, por lo que estos cálculos deben actualizarse constantemente de acuerdo con el precio de venta del momento en que se esté considerando este dato.

Donde:

$HC_{\text{Tpías}}$ Huella de carbono del transporte de piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) a la tequilera $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{t_{\text{piña}}}\right)$.

ECE Emisiones de carbono equivalentes para las operaciones en campo, valor promedio de emisiones para diésel mexicano de $2.596\left(\frac{kg\ CO_2}{L}\right)$ (INECC, 2014).

CC Consumo de combustible para el transporte de piñas de agave por el total de kilómetros recorridos (L). Esto se calcula con el factor de 2.5 km recorridos/L diésel.

OTP Número de veces que se realiza el transporte de piñas (adimensional).

TPC Tasa de producción del combustible reportado como 1.24 (Ali *et al.*, 2017).

$C_{\text{camión}}$ Capacidad de carga del camión utilizado para el transporte de piñas, es decir, 20 $t_{\text{piña}}$ por viaje (datos obtenidos en campo).

Tabla 7. Datos utilizados para el cálculo de la huella de carbono en el transporte de *Agave tequilana* Weber (var. azul) del campo a una tequilera ubicada en Tequila, Jalisco.

Datos	Amatitán	Atotonilco el Alto	Arandas
Distancia a la planta (km)	12	160	192
Rendimiento piñas (t/ha) ^a	90	74	106
Superficie cosechada (ha/año) ^b	800	760	1900
Capacidad camión (t)	20	20	20
Gasto diésel (km/L)	2.5	2.5	2.5

^a Base húmeda.

^b El rendimiento de MJ de bioetanol producido con la biomasa de agave, se encuentra en la sección 9.

Ahora, para el cálculo de la huella de carbono asociada a las emisiones generadas en el proceso de producción de tequila hasta la etapa de generación de bagazo, se usó como referencia lo publicado por el Centro Mario Molina en el año 2016²⁸, que reporta un uso de combustibles fósiles y electricidad de 1.3 kg CO₂/L tequila. Teniendo en cuenta que para producir 1 L de tequila se necesitan 7 kg de piña de *Agave tequilana* Weber (var. azul), la huella de carbono de producir 1 L de tequila es 185.7 kg CO₂/ t piña, en este estudio basándonos en que la mitad de las operaciones de la producción de tequila se llevan a cabo hasta la etapa de molienda, donde la mayor contribución de las emisiones se debe al consumo de combustibles fósiles para la generación de vapor en la etapa de cocimiento de piñas²⁹, se realizó la suposición de que el 50% de estas emisiones corresponden a la producción de bagazo, es decir la huella de carbono de la producción de tequila hasta la etapa de molienda sería 92.86 kg CO₂/ t piña.

La huella de carbono del bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) se obtuvo realizando una segunda asignación de impactos a la suma de las huellas de carbono correspondientes a las piñas en la etapa del cultivo de *A. tequilana*, el transporte de estas piñas y la producción de tequila hasta la etapa de molienda (ecuación 22). Las fracciones de asignación se encuentran en el ANEXO D.

$$HC_{bagazo} = \frac{HC_{Tpiñas} \times FAI_{bagazo}}{0.2} \quad \dots [22]$$

Donde:

HC_{bagazo} Huella de carbono del bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul)

HC_{Tpiñas} Huella de carbono total de las piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul), ecuación 22.1. $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{t\ piña}\right)$.

FAI_{bagazo} Factor de asignación de impactos del bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul), ecuación 22.2. (adimensional).

²⁸ Estrategia de sustentabilidad de la cadena agave-tequila

²⁹ Salvador Rosales, Tequila Cascahuin. Comunicación personal (2018) e información presente en la publicación del Centro Mario Molina.

0.2 Factor de conversión $\frac{0.2 \text{ t bagazo}}{\text{t piña}}$

$$HC_{T\text{piñas}} = HC_{cp} + HC_{tp} + HC_{trp} \quad \dots [22.1]$$

Donde:

$HC_{T\text{piñas}}$ Huella de carbono total de las piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) $\left(\frac{\text{kg } CO_2 \text{ eq}}{\text{t piña}}\right)$.

HC_{cp} Huella de carbono del cultivo correspondiente a las piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) $\left(\frac{\text{kg } CO_2 \text{ eq}}{\text{t piña}}\right)$.

HC_{tp} Huella de carbono del transporte de las piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) a la tequilera $\left(\frac{\text{kg } CO_2 \text{ eq}}{\text{t piña}}\right)$.

HC_{trp} Huella de carbono de la producción de tequila (hasta la etapa de molienda) $\left(\frac{\text{kg } CO_2 \text{ eq}}{\text{t piña}}\right)$.

$$FAI_{\text{bagazo}} = \frac{fm \times fv}{\sum(fm \times fv)} \quad \dots [22.2]$$

Donde:

FAI Factor de asignación de impactos correspondiente al bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (adimensional).

F_m Fracción másica del producto (0.2 para bagazo³⁰). Adimensional.

F_v Fracción de valor del producto (Ecuación 22.3). Adimensional.

$$f_v = \frac{C_p}{C_T} \quad \dots [22.3]$$

C_p Costo del producto $\left(\frac{\$}{t}\right)$. El costo de la tonelada de bagazo es de \$480³¹.

C_T Costo total (piñas mas bagazo) $\left(\frac{\$}{t}\right)$.

³⁰ Determinado en laboratorio para este estudio

³¹ Este dato se obtuvo en entrevistas durante el trabajo de campo, para el costo de la biomasa se tomó como base el reportado en Arellano-Hernández, 2018 para paja de trigo.

8.2.4. CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA

La huella hídrica es un indicador que consta de tres componentes: huella hídrica azul, huella hídrica verde y huella hídrica gris (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009). En la etapa de generación de biomasa, la huella hídrica azul hace referencia al agua superficial y/o subterránea evaporada de riego durante el crecimiento del cultivo, así como el agua dulce utilizada en la producción de tequila donde se genera el bagazo.

La huella verde se refiere al agua de lluvia que no se convierte en escorrentía porque es consumida por la planta, principalmente durante el crecimiento del cultivo.

En la etapa de generación de la biomasa³², la huella gris representa el volumen de agua necesaria para diluir los contaminantes descargados al ambiente debido a la aplicación de fertilizantes durante el crecimiento de la planta y está ligado a los estándares de calidad de agua del lugar de estudio; en la producción de bagazo se refiere al agua utilizada en la dilución de los contaminantes generados en el proceso de producción de tequila³³.

El cálculo de la huella hídrica reportado en este estudio corresponde al ciclo de cultivo de mayo 2012-abril de 2018 en los sitios de estudio seleccionados, dado que las plantaciones visitadas datan de tales fechas desde su establecimiento. Para la huella hídrica total de la producción de etanol a partir de biomasa de *Agave tequilana* Weber (var. azul), se usó la ecuación 23 para los escenarios 1 y 2 descritos anteriormente. Debido a que en la etapa agrícola de la producción de agave, las cantidades están referenciadas a la ha producida, se realizó una asignación de impactos para transformar el consumo de agua a MJ de bioetanol, los resultados se muestran en la sección 9.1.

³² Específicamente en el cultivo del *Agave tequilana* Weber (var. azul)

³³ Desde la cocción hasta la molienda de las piñas, proceso del cual es resultante el bagazo

$$HH_{Total} = HH_{GB} + HH_{TrBE} \quad \dots [23]$$

$$HH_{GB} = HHA_{GB} + HHV_{GB} + HHG_{GB} \quad \dots [23.1]$$

$$HH_{TrBE} = HHA_{TrBE} + HHG_{TrBE} \quad \dots [23.2]$$

Donde:

HH_{Total} Huella hídrica total de la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* $\left(\frac{L H_2O}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

HH_{GB} Huella hídrica de la generación de biomasa residual, que para el escenario 1 considera solo bagazo, y para el escenario 2 hojas y bagazo $\left(\frac{L H_2O}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

HHA_{GB} Huella hídrica azul de la generación de biomasa residual $\left(\frac{L H_2O}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

HHV_{GB} Huella hídrica verde de la generación de biomasa residual $\left(\frac{L H_2O}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

HHG_{GB} Huella hídrica gris generación de biomasa residual $\left(\frac{L H_2O}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

HH_{TrBE} Huella hídrica de la transformación de biomasa residual en bioetanol $\left(\frac{L H_2O}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

HHA_{TrBE} Huella hídrica azul de la transformación de biomasa residual en bioetanol $\left(\frac{L H_2O}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

HHG_{TrBE} Huella hídrica gris de la transformación de biomasa en bioetanol $\left(\frac{L H_2O}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

El cálculo de la huella hídrica en la etapa de generación de biomasa residual en el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) se realizó de acuerdo con las ecuaciones reportadas en Renderos (2014) y Scarpate et al. (2016) para determinar la huella azul, verde y gris. El consumo de agua consideró los límites del sistema mostrados en la Figura 7.

Como se mencionó anteriormente, el *Agave tequilana* Weber (var. azul) es una planta que presenta metabolismo ácido crasuláceo (CAM por sus siglas en inglés), por lo que no requiere irrigación; además, los cultivos de esta planta en el estado de Jalisco son de régimen temporal, de esta forma la huella hídrica azul en el cultivo de agave se contabilizó como cero. Sin embargo, en la obtención de bagazo, la huella hídrica azul se obtuvo tomando como base que se requieren 9.5 L agua/L tequila hasta la trituración de las piñas³⁴, y usando como factor que para producir 1L de tequila se requieren 7 kg de piña de agave³⁵ (ecuación 24).

$$HHV_{bagazo} = \frac{\left(\frac{1360 \text{ L } H_2O}{t_{piña}}\right) \times FAI_{bagazo}}{0.2} \quad \dots [24]$$

Donde:

HHV_{bagazo} Huella hídrica azul del bagazo de agave $\left(\frac{\text{L } H_2O}{t_{bagazo}}\right)$.

FAI_{bagazo} Factor de asignación de impactos del bagazo de agave, [ecuación 22.2](#). (adimensional).

0.2 Factor de conversión $\left(\frac{0.2 \text{ t } bagazo}{t_{piña}}\right)$.

La huella hídrica verde se calculó con la ecuación 25, donde es importante el requerimiento de agua del cultivo, por lo que fue necesario determinar algunos valores utilizando datos climáticos entre las que se encuentran la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva durante el periodo comprendido entre mayo 2012- abril 2018, como se explica más adelante.

$$HHV_{GB} = HHV_{cultivo} \times FAI \quad \dots [25]$$

³⁴ Comunicación personal, Salvador Rosales, Tequila Cascahuin.

³⁵ Información obtenida en entrevistas

Donde:

HHV_{GB} Huella hídrica verde de la generación de biomasa residual $\left(\frac{L H_2O}{t}\right)$.

$HHV_{cultivo}$ Huella hídrica verde del cultivo de agave $\left(\frac{L H_2O}{t}\right)$.

FAI Factor de asignación de impactos (adimensional), [ecuación 22.2](#).

Para el cálculo de la huella hídrica verde del cultivo tenemos las ecuaciones 26 y 27 que toman en cuenta dos condicionantes que involucran la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva.

Si $ET_C < P_{ef}$ entonces:

$$HHV_{cultivo} = \frac{\sum_{d=1}^{d=n} ET_C}{Y_p} \times 10 \quad \dots [26]$$

Si $P_{ef} < ET_C$ entonces:

$$HHV_{cultivo} = \frac{\sum_{d=1}^{d=n} P_{ef}}{Y_p} \times 10 \quad \dots [27]$$

Donde:

$HHV_{cultivo}$ Huella hídrica verde del cultivo de *Agave tequilana* $\left(\frac{m^3 H_2O}{t}\right)$.

$\sum_{d=1}^{d=n} Etc$ Evapotranspiración total del cultivo desde el día de plantación hasta el día de jima, es decir durante el periodo de tiempo evaluado (mm).

$\sum_{d=1}^{d=n} P_{ef}$ Precipitación efectiva total, calculada utilizando el software CROPWAT 8.0 a partir de la precipitación registrada durante el periodo evaluado (mm).

Y_p Rendimiento del producto, piñas o pencas según corresponda $\left(\frac{t}{ha}\right)$

10 Factor de conversión de mm a $\frac{m^3}{ha}$

En la estimación de la evapotranspiración del cultivo Etc, es necesario conocer la evapotranspiración de referencia (ET_0). Para ello se tomaron como referencia los valores de las estaciones climatológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) cercanas a los sitios de estudio. A partir de estos datos y usando la aplicación para el cálculo de la evapotranspiración³⁶ se estimó dicho valor de manera mensual para el periodo evaluado con datos disponibles en el Servicio Meteorológico Nacional ³⁷ para el Estado de Jalisco. A partir de estos datos se calcularon también la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la precipitación efectiva (P_{eff}).

Tabla 8. Estaciones meteorológicas tomadas como referencia para datos climáticos del cultivo de *A. tequilana* Weber (var. Azul).

Sitio	Estación
Amatitán	El Llano
	Tala 3
Atotonilco el Alto	Tepatitlán 3
Arandas	Tepatitlán 3

Para calcular el total de la huella verde se realizó la sumatoria de todos los datos meteorológicos mensuales durante el periodo evaluado; cabe recalcar que cuando se tuvo la falta de datos en las estaciones de interés durante ciertos periodos de tiempo, se promediaron los datos específicos de ese mes en los años evaluados para contar con dicho valor. Aunque los valores de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (Etc) y los requerimientos de agua del cultivo son idénticos, los requerimientos de agua del cultivo (RAC) se refieren a la cantidad de agua que debe suministrarse, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua que se pierde a través de la evaporación y de la transpiración (Allen, Pereira, Raes, Dirk y Smith, 2006).

³⁶ Disponible en <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/aplicaciones/eto.aspx>

³⁷ <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. Consultado en mayo de 2018.

Para conocer la evapotranspiración del cultivo (ET_c) *Agave tequilana* Weber var. azul en condiciones estándar, se realizó la suposición de que el cultivo no tiene limitaciones en su desarrollo debido a estrés hídrico. El valor de ET_c se calculó utilizando el coeficiente único del cultivo K_c para *Agave sisalana* (FAO, 2000) dicho coeficiente incorpora el efecto de condiciones atmosféricas y características del cultivo a la evapotranspiración de referencia, los valores empleados se encuentran en la Tabla 9. La ET_c se calculó con la ecuación 28.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \dots [28]$$

Donde:

K_c Es el coeficiente único del cultivo (Tabla 9).

ET_0 Es la evapotranspiración del cultivo (mm).

Tabla 9. Valores de coeficiente único del cultivo para *Agave sisalana* durante las distintas etapas de su crecimiento utilizados para *A. tequilana* Weber (var. azul). (FAO, 2000).

Período	K_c
Mayo 2012- 2013	0.35
2014-2015	0.70
2016- Abr 2018	1.50

Como se mostró en las ecuaciones 26 y 27, con los resultados obtenidos de evapotranspiración del cultivo y precipitación efectiva se determinó la huella hídrica verde de la generación de biomasa.

Finalmente, la huella hídrica gris de la generación de biomasa se calcula a partir de la ecuación 29, en la generación de bagazo esta huella no se calculó debido a la falta de datos.

$$HHG_{GB} = HHG_{cultivo} \times FAI \quad \dots [29]$$

Para conocer la HHG del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) se utilizó la ecuación 30.

$$HHG_{cultivo} = \frac{\left(\frac{\alpha \times TA}{C_{max} - C_{nat}} \right)}{Y_p} \quad \dots [30]$$

Donde:

HHG _{cultivo}	Huella hídrica gris del cultivo de agave $\left(\frac{m^3 H_2O}{t} \right)$.
A	Fracción de escorrentía de lixiviación (adimensional), se tomó como 0.1.
TA	Tasa de aplicación de agroquímicos (nitrogenados) por hectárea $\left(\frac{kg}{ha} \right)$.
C _{max}	Concentración máxima aceptable del contaminante $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$.
C _{nat}	Concentración natural para el contaminante considerado $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$.
Y _p	Rendimiento de producto, piñas o pencas según corresponda $\left(\frac{t}{ha} \right)$.
FAI	Factor de asignación de impactos para piñas o pencas (adimensional), ecuación 22.2.

El valor de la huella hídrica gris está principalmente ligado a la carga de nutrientes de las aguas residuales agrícolas, municipales e industriales. En el cultivo de *Agave tequilana* Weber var. azul se aplican distintos nutrientes tales como nitrógeno (N), potasio (K), fósforo (P), además de herbicidas y fungicidas. Sin embargo, los fertilizantes nitrogenados se aplican en mayores concentraciones, por esta razón para el cálculo de la HHG se tomó en cuenta únicamente la concentración de nitrógeno.

De acuerdo con lo reportado en la literatura (Mekonnen y Hoekstra, 2015; Pellicer-Martínez *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017) la fracción de nitrógeno que alcanza cuerpos de agua superficial (α) representa solo el 10% del total aplicado como nutriente en cultivos. Para el término C_{max}, se utilizó como referencia la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece como límite de concentración de nitrógeno en cuerpos de agua un promedio mensual de 40 mg/L presentes en ríos y embalses. Por otro lado, la concentración natural de nitrógeno (C_{nat}) se tomó como cero por la falta de datos y para simplificar el cálculo; sin embargo, cabe recalcar que de forma natural los ríos transportan algunos nutrientes que se depositan en otros cuerpos de agua como lagos o lagunas (Lovarelli *et al.*, 2016).

Para el cálculo de la huella azul referente al agua dulce utilizada en el procesamiento de las piñas en la tequilera, el dato que se utilizó como referencia fue de 9.5 L agua/L tequila, lo cual da una HHA de 1.35 m³/t piña, lo que para la cadena productiva agave-tequila da una huella hídrica total de 3.21 m³/t piña a 4.6 m³/t piña para el escenario 1 y de 3.95 m³/t a 5.91 m³/t para el escenario 2 correspondiente a la HH de piñas y pencas de *Agave tequilana* Weber (var. azul).

8.2.5. CÁLCULO DE INDICADORES SOCIALES (EMPLEOS E INGRESO)

En el presente estudio los indicadores sociales se midieron en términos de número de empleos directos y los ingresos que estos generarían si se utiliza la biomasa residual de *Agave tequilana* como materia prima para la producción de bioetanol. Dichos empleos se refieren a la mano de obra relacionada con la recolección de la biomasa en campo, su transporte y procesamiento en la biorrefinería para su conversión en bioetanol.

En la etapa de generación de biomasa, la creación de empleos se visualizó estrechamente relacionada con el cultivo de agave y la producción de tequila; la generación de empleos en el transporte de la biomasa se incrementaría con el uso de vehículos y optimización de rutas para su traslado a la biorrefinería donde los empleos serían tangibles conforme el desarrollo de la industria tal como ha sucedido en Brasil con la biomasa de caña de azúcar ³⁸.

Los salarios en la producción de bioetanol con biomasa residual de agave se platean similares a los existentes en la industria tequilera, estos, se desglosaron por etapa y por tipo de trabajo ya sea agrícola vinculado a la recolección, transporte o industrial relacionado con la biorrefinería tomando como referencia lo reportado en literatura.

³⁸ En el reporte de trabajos en la producción de biocombustibles líquidos, la Agencia Internacional de Energías Renovables (2018) menciona que en Brasil se generaron 795, 000 nuevos empleos y en Colombia 190,800 en la producción de bioetanol de caña de azúcar y biodiesel.

Para conocer el número de empleos generados en cada una de las etapas de la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* W. var azul, se realizaron entrevistas a productores de agave de los sitios de estudio elegidos, la guía de preguntas se encuentra en el [ANEXO B](#).

A partir de los resultados obtenidos en dichas entrevistas, se realizó el cálculo de empleos en la etapa de generación de biomasa.

En este trabajo, se entiende a los ingresos como el salario percibido por las personas involucradas en las etapas analizadas dentro del sistema de producción de etanol utilizando la biomasa de *A. tequilana* Weber (var). azul.

$$NE_{GB} = NE_{cultivo} + NE_{bagazo} \quad \dots [31]$$

Donde:

NE_{GB} Número de empleos en la generación de biomasa residual $\left(\frac{\text{número}}{MJ}\right)$.

$NE_{cultivo}$ Número de empleos generados durante el cultivo de *Agave tequilana* $\left(\frac{\text{número}}{t}\right)$.

$$NE_{cultivo} = \frac{EPT + EPIC + EMC + EJ}{Y_p} \quad \dots [31.1]$$

$$NE_{bagazo} = \frac{ETP + ECP + EMP}{Y_{bagazo}} \quad \dots [31.2]$$

Donde:

EPT Número de empleos en la preparación del terreno $\left(\frac{\text{número}}{ha}\right)$.

EPIC Número de empleos en la plantación del cultivo $\left(\frac{\text{número}}{ha}\right)$.

EMC Número de empleos en el mantenimiento del cultivo $\left(\frac{\text{número}}{ha}\right)$.

EJ	Número de empleos en la jima del cultivo, incluye a las personas involucradas en el transporte de piñas a la tequilera $\left(\frac{\text{número}}{\text{ha}}\right)$.
Y _p	Rendimiento de producto piñas o pencas según corresponda $\left(\frac{t}{\text{ha}}\right)$.
NE _{bagazo}	Número de empleos de la generación de bagazo de <i>Agave tequilana</i> $\left(\frac{\text{número}}{t}\right)$.
ETP	Número de empleos en la trituración de piñas (número).
ECP	Número de empleos en la cocción de piñas (número).
EMP	Número de empleos en la molienda de piñas (número).
Y _{bagazo}	Rendimiento de bagazo en t calculado a partir de $\left(\frac{t \text{ piña}}{\text{ha}} \times \frac{0.2 t_{\text{bagazo}}}{t \text{ piña}}\right)$.

Para conocer el ingreso percibido en cada una de las etapas de la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana W. var azul*, se realizó el mismo método que para el número de empleos, es decir, entrevistas a productores en los sitios de estudio elegidos (guía en el ANEXO B).

A partir de los resultados obtenidos en dichas entrevistas, se realizó el cálculo del ingreso para el cálculo para la etapa de generación de biomasa ³⁹ (ecuación 32).

$$I_{GB} = I_{cultivo} + I_{bagazo} \quad \dots [32]$$

Donde:

I_{GB} Ingreso percibido en la generación de biomasa residual $\left(\frac{\$}{MJ}\right)$.

I_{cultivo} Ingreso percibido durante el cultivo de *Agave tequilana* $\left(\frac{\$}{t}\right)$.

$$I_{cultivo} = \frac{IPT + ISC + IMC + IJ}{Y_p} \quad \dots [32.1]$$

³⁹ Para calcular el ingreso se tomó como base el salario promedio por hectárea de los empleos generados en la producción de *Agave tequilana* Weber (var. azul).

$$I_{bagazo} = \frac{IBagazo_{teq}}{Y_{bagazo}}$$

... [32.2]

Donde:

IPT Ingreso percibido en la preparación del terreno $\left(\frac{\$}{ha}\right)$.

ISC Ingreso percibido en la siembra del cultivo $\left(\frac{\$}{ha}\right)$.

IMC Ingreso percibido en el mantenimiento del cultivo $\left(\frac{\$}{ha}\right)$.

IJ Ingreso percibido en la jima del cultivo, incluye el salario de las personas involucradas en el transporte de piñas a la tequilera $\left(\frac{\$}{ha}\right)$.

Y_p Rendimiento de producto piñas o pencas según corresponda $\left(\frac{t}{ha}\right)$.

I_{bagazo} Ingreso en la generación de bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) $\left(\frac{\$}{t}\right)$.

$IBagazo_{teq}$ Ingreso de la generación de bagazo, desde el troceado hasta la molienda de piñas en la tequilera (\$).

Y_{bagazo} Rendimiento de bagazo en t calculado a partir de $\left(\frac{t\ piña}{ha} \times \frac{0.2\ t_{bagazo}}{t\ piña}\right)$.

8.2.6. CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS: RENTABILIDAD

Para este estudio se determinó como indicador económico la rentabilidad en la producción de bioetanol utilizando biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) como materia prima. Esta es definida como los beneficios o las ganancias monetarias obtenidas de una operación económica una vez descontados los costos de operación y mantenimiento, por lo que este indicador representa la comparación entre el precio de venta del producto final (bioetanol) y los recursos monetarios invertidos para su producción (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2016; Subedi *et al.*, 2017). Para calcular la rentabilidad de producir bioetanol a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul), fue necesario determinar los costos totales de su producción.

Para la etapa de generación de biomasa, la información económica requerida para el cálculo de los costos asociados al cultivo de agave se obtuvo de un reporte de costos proporcionado por el Consejo Regulador del Tequila (CRT) correspondiente al 2017. En cuanto a la información de la producción de tequila se extrajo de entrevistas semi estructuradas realizadas a productores de tequila (guía de preguntas en [ANEXO C](#)) y el costo de producción de 1 MJ bioetanol 2G se obtuvo de Sánchez et al., (2016).

Para calcular el costo de la generación de biomasa (CGB) de *Agave tequilana* Weber (var. azul), se tomaron en cuenta dos elementos: 1) el costo de pencas y piñas asociado al cultivo de agave, 2) el costo de la producción de bagazo asociado a la transformación de las piñas en la tequilera, ambos bajo el esquema actual de la producción de tequila. Los costos totales involucran el establecimiento de la plantación (preparación del terreno y costo de hijuelos), costo del jornal, rentas e insumos (agroquímicos, abono), transporte de piñas a la tequilera, costo de mano de obra, electricidad, combustóleo, entre otros.

En la Figura 12 se muestra el método empleado para asignar los costos a la biomasa derivados del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) y producción de tequila respectivamente. El primer paso a seguir fue una asignación del costo de producción de cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) a las pencas y a las piñas; el segundo paso, fue la asignación de costos de la generación de bagazo derivado de la producción de tequila; y el tercer paso fue el cálculo del costo total que para el escenario 1 es igual al costo de la producción de bagazo, mientras que para el escenario 2 es igual a la suma de costos de pencas y bagazo.

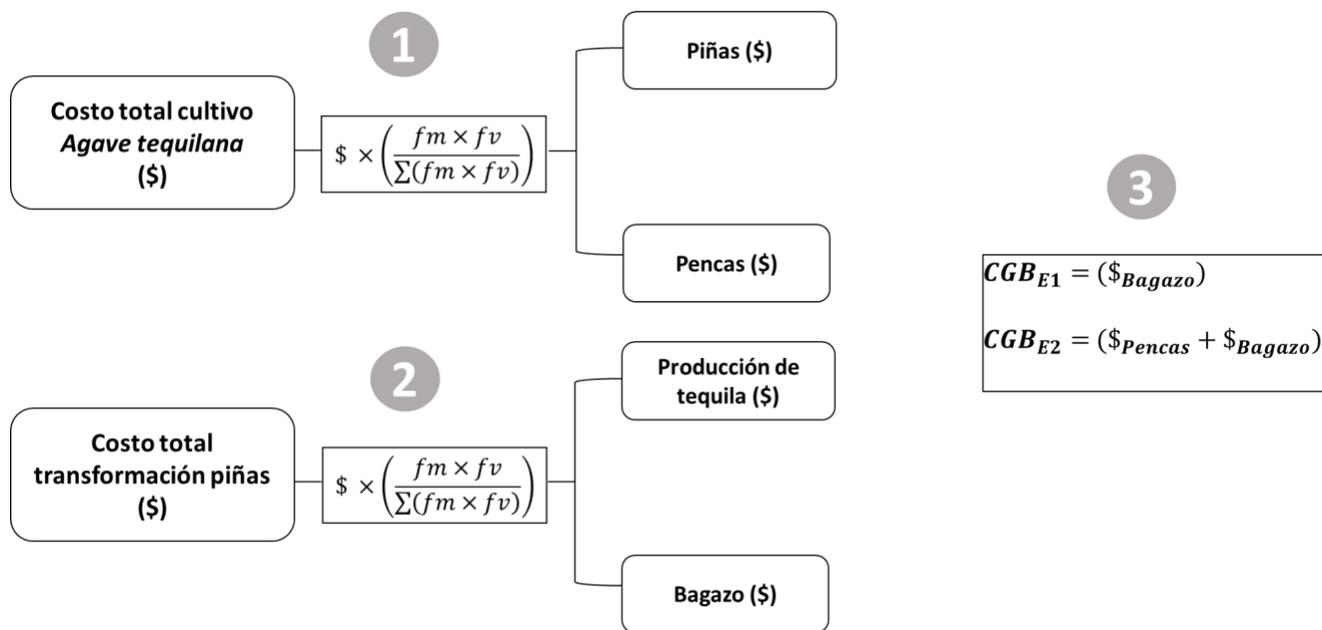


Figura 12. Asignación de impactos de los costos totales de la generación de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para la producción de bioetanol 2G. Elaboración propia.

8.3. CÁLCULO DE INDICADORES EN ETAPA DE TRANSPORTE DE BIOMASA

El transporte de la biomasa (bagazo y bagazo/pencas) está relacionado con su recolección y traslado hacia la biorrefinería donde se transformará en etanol (localizada en el municipio de Tequila, ver sección 8.1.2). Para este estudio se considera un transporte por carretera desde el punto donde la biomasa estará disponible hasta la ubicación de la biorrefinería (Figura 8). Actualmente, la industria del tequila utiliza camiones con capacidad de 20 toneladas para transportar las piñas a las tequileras. Por lo tanto, se plantea que la biomasa se transportará en vehículos con esas mismas características.

8.3.1. CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO EN EL TRANSPORTE DE LA BIOMASA

En el transporte del bagazo se consideró que esta biomasa se genera en tequileras del Municipio de Tequila, Jalisco con un contenido de humedad de 50%, y para conocer el trayecto que recorrería hasta la biorrefinería, se realizó el cálculo de la distancia promedio existente entre 13 distintas tequileras ubicadas en dicho sitio; lo cual resultó en 4 km, también se calcularon las emisiones si el radio de recolección es de 5 y 10 km. En cuanto al transporte de la biomasa de pencas generada en los sitios de interés (escenario 2), se consideró que éstas tendrán un 30% de humedad al momento de su traslado a la biorrefinería ubicada en Tequila, Jalisco. Para el cálculo de la huella de carbono en el transporte de biomasa se utilizaron los datos del [ANEXO D](#).

Después, haciendo uso de la ecuación 33 para transporte de la biomasa, se calcularon las emisiones de GEI asociadas a esta etapa con los datos de la Tabla 10.

$$HC_{T_{pñas}} = \frac{ECE \times CC \times OTP \times TPC}{C_{camión}} \quad \dots [33]$$

Donde:

HC_{TB} Huella de carbono del transporte de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) a la biorrefinería $\left(\frac{kg\ CO_2\ eq}{t_B}\right)$.

ECE Emisiones de carbono equivalentes para las operaciones en campo, valor promedio de emisiones para diésel mexicano de $2.596\ \left(\frac{kg\ CO_2}{L}\right)$ (INECC, 2014).

CC Consumo de combustible para el transporte de biomasa de pencas por el total de kilómetros recorridos $\left(\frac{L}{km}\right)$.

OTP Número de veces que se realiza el transporte de biomasa residual (adimensional).

TPC Tasa de producción del combustible reportado como 1.24 (Ali *et al.*, 2017).

$C_{camión}$ Capacidad de carga del camión utilizado para el transporte de pencas, es decir, 20 $t_{biomasa}$ por viaje.

Como se mencionó anteriormente, la capacidad teórica de la biorrefinería es de 200 t de biomasa seca/día con lo cual, al tener camiones con capacidad de carga de 20 t, en el escenario 1 donde se contempla únicamente utilizar la biomasa de bagazo proveniente de tequileras ubicadas en el Municipio de Tequila, Jalisco, con una humedad promedio de 50% se realizarían 20 viajes diarios para suplir la alimentación de la planta, esto significaría 2 o 3 operadores en total.

En el escenario 2 el porcentaje de biomasa seca de pencas y bagazo requerida para suplir la demanda diaria de la biorrefinería es de 22% y 78% respectivamente. El número de viajes requeridos para cumplir con el porcentaje de bagazo serían 16 con una humedad del 50% y 17 viajes de pencas con un contenido de humedad del 30% lo que requeriría el doble de personal planteado en el escenario 1, es decir 6 empleos. En este escenario, es importante decir que se debe considerar el tiempo entre viajes (alrededor de 3h solo de ida), sobre todo por el número de horas laboradas diariamente alrededor de 8-10 h, para considerar el número de unidades que realizarían este transporte de biomasa.

8.3.2. CÁLCULO DE INDICADORES SOCIALES: EMPLEOS E INGRESO

El transporte de biomasa residual involucra la creación de empleos en la recolección, carga y traslado a la biorrefinería. En el caso del escenario 2 la creación de empleos se vislumbró en los campos agrícolas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) donde se generan las pencas y en su transporte a la biorrefinería. Además de la recolección de bagazo en las tequileras, el transporte de bagazo se consideró igual al número de operadores encargados de transportarlo hacia la biorrefinería por su disponibilidad en las tequileras.

Luego de calcular la cantidad de biomasa disponible para su transformación en bioetanol, se realizaron los cálculos pertinentes tomando en cuenta la cadena de suministro que abastecería a la biorrefinería planteada en este estudio. Cabe aclarar que no se consideraron los empleos indirectos relacionados con la construcción de la biorrefinería.

El número de empleos en esta etapa se calculará con la ecuación 34.

$$NE_{TB} = NE_{recolección} + NE_{carga} + NO_{TB} \quad \dots [34]$$

Donde:

- NE_{TB} Número de empleos en el transporte de biomasa residual (número/t)⁴⁰.
- $NE_{recolección}$ Número de empleos en la recolección de biomasa residual (número). Suponiendo que se generan los mismos empleos que durante la jima de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (5 a 7 jimadores por cada 20 t).
- NE_{carga} Número de empleos en la recolección de biomasa residual suponiendo que se generan los mismos empleos que durante la jima de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (4 a 5 cargadores por cada 20 t, (número).
- NO_{TB} Número de operadores involucrados en el transporte de biomasa residual (número) por viaje realizado.

El ingreso en la etapa de transporte de biomasa se basó en las mismas suposiciones que en la generación de empleos, tomando el promedio de los salarios de jimadores y cargadores del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para la recolección y carga de biomasa residual, en el traslado, el salario se tomó como el de un jornal (\$250 MXN/día).

$$I_{TB} = I_{recolección} + I_{carga} + I_{TB} \quad \dots [35]$$

Donde:

- I_{TB} Ingreso percibido en el transporte de biomasa residual (\$/t).
- $I_{recolección}$ Ingreso percibido en la recolección de biomasa residual (\$/t). Suponiendo que los salarios son los mismos de los jimadores de agave (\$200 MXN/t jimada).
- I_{carga} Ingreso percibido en la recolección de biomasa residual suponiendo que los salarios son los mismos de los cargadores de agave (\$60 MXN/t cargada).

⁴⁰ Se considera que la biomasa se transporta en toneladas (unidad másica) para su posterior transformación al biocombustible de interés, que se representa con una unidad de energía (MJ).

I_{TB}

Ingreso percibido en el transporte de biomasa residual (\$250 MXN/t⁴¹).

8.3.3. CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS

Para calcular el costo del transporte de biomasa, se tomó como la variable principal el gasto asociado a su traslado a la biorrefinería. A saber, los costos de los factores como la distancia total del punto donde se genera la biomasa residual al lugar donde se ubica la biorrefinería (ANEXO D), el tiempo requerido para transportar esta biomasa, además del costo de salarios. Cabe mencionar que otros parámetros importantes a considerar son el costo de mantenimiento de los camiones, insumos (primordialmente diésel y viáticos), las rutas más adecuadas por las cuales deberán transportarse, y aseguranzas además del tiempo de carga y descarga (Worldwatch Institute, 2007; Bonilla y Whittaker, 2015; Bonomi *et al.*, 2016) aunque en esta investigación no se sumó el capital asignado a estos parámetros, es importante tomarlos en cuenta para una cuantificación más precisa. Los costos totales de la etapa de transporte de la biomasa residual se determinaron con la ecuación 36.

$$CTB = CI + CM + CS \quad \dots [36]$$

Donde:

CTB Costo del transporte de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) a la biorrefinería $\left(\frac{\$}{t_B}\right)$.

CI Costo de insumos para el transporte $\left(\frac{\$}{t_B}\right)$.

CM Costo de mantenimiento de los camiones empleados para el transporte $\left(\frac{\$}{t_B}\right)$.

CS Costo total de salarios destinados a los empleos generados en el transporte $\left(\frac{\$}{t_B}\right)$.

⁴¹Dividiendo el salario entre las 20 toneladas por camión.

8.4. CÁLCULO DE INDICADORES EN ETAPA DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA EN ETANOL 2G

Para el esquema de biorrefinería seleccionado (ver Figura 8), se tomaron los indicadores reportados por los autores referente a: gases de efecto invernadero emitidos, consumo de agua, calidad del agua, cantidad de residuos sólidos producidos, relación de uso final de energía, rendimiento, costo de producción, reducción de las importaciones de combustibles fósiles, fracción del total nacional de bioenergía producida en la planta y productividad eléctrica de la planta.

En la Tabla 10 se muestran las especificaciones de alimentación de la biorrefinería alimentada con biomasa, que para este trabajo se supondrá serán las mismas que biomasa de bagazo/pencas ajustando sólo la composición de la biomasa.

Tabla 10. Flujos de entrada de la biorrefinería de alimentación simple. Adaptado de Sánchez *et al.*, 2016.

Corriente de entrada	Flujo (t/d)	Componente	% (p/p)	Costo (USD/t)
Paja de trigo	500	Celulosa	45	
		Hemicelulosa	17	75
		Lignina	6	
Agua fresca	1490	-	-	0.20
Vinazas	390	COD (mg/L)	102,447	0
		BOD (mg/L)	60,827	

8.4.1. CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO Y HUELLA HÍDRICA

La huella de carbono de la transformación de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) (HC_{TrBE}) se determinó tomando como base 426 g CO_2_{eq} / MJ con un 45% de celulosa (Sánchez et al., 2016), a partir de la cual se recalculó las emisiones para un contenido de celulosa para la biomasa de cada sitio de estudio evaluado. Mientras que la huella hídrica azul (HHA_{TrBE}) de la producción de bioetanol 2G se calculó utilizando el flujo de agua fresca (Tabla 10).

8.4.2. CÁLCULO DE INDICADORES SOCIALES (EMPLEOS E INGRESO)

Los indicadores sociales se tomaron de lo reportado por Magaña-Mendoza (2018) de 0.06 empleos/t biomasa residual correspondientes al número total de operadores dentro de la planta, lo que para la planta con capacidad de 200 t biomasa/día el número de empleos es de 12, es decir, un empleo por unidad de proceso considerando jornadas laborales de 40 h semanales. En dicho trabajo se señala que con más etapas de proceso se requiere una mayor cantidad de operadores a pesar de que la capacidad de procesamiento sea la misma. En cuanto a los ingresos menciona que son iguales para todos los operadores (8, 285 USD/año⁴² por operador en planta). Lo anterior, para cifras del año 2022 representaría \$18,718.7 pesos mexicanos anuales por cada empleo generado siguiendo los estándares de crecimiento económico en nuestro país (ver ecuación 37).

⁴² De acuerdo con valores promedio del Banco de México, el valor anual de 1 USD en 2018, fue de 19.242 MXN. Aunado a esto, la inflación correspondiente al 2018 fue de 5.55% de acuerdo con datos del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/temas/inpc/>).

8.4.3. CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS

De acuerdo con lo reportado por Sánchez et al. (2016), el costo de producción de 1 MJ etanol es 0.14 USD/MJ con valor monetario del 2013, para tener el precio actual en pesos se convirtió el costo del dólar a pesos y se ajustó con el valor de la inflación del peso mexicano (MXN) para el año 2022 (ecuación 37), el precio actual de producir 1 MJ de etanol resultaría 4.07 MXN. La inflación y el tipo de cambio histórico de USD a MXN se consultó en la página del Banco de México⁴³.

$$C_{actual} = C_{inicial} \times \frac{IPC_{final}}{IPC_{inicial}} \quad \dots [37]$$

Donde:

C_{actual}	Costo actual de producir 1 MJ de etanol 2G a partir de biomasa para precios de 2022 en MXN.
$C_{inicial}$	Costo inicial de producir 1 MJ de etanol en MXN (0.14 USD ₂₀₁₃ , 1 USD ₂₀₁₃ = 12.869 MXN ₂₀₁₃).
IPC_{final}	Índice de precio al consumidor ⁴⁴ equivalente a 7.82% en 2022.
$IPC_{inicial}$	Índice de precio al consumidor equivalente a 3.47% en 2013.

⁴³Consultado el 4 de abril del 2023 en:

<https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=6&accion=consultarCuadro&idCuadro=CF86&locale=es>

⁴⁴ Consultado el 4 de abril del 2023 en:

https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/inpc_2q/inpc_2q2023_01.pdf

8.5. CÁLCULO DE INDICADORES AMBIENTALES, SOCIALES Y ECONÓMICOS GLOBALES

Luego de calcular los indicadores correspondientes a cada etapa de la producción de bioetanol a partir de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul), se integraron los resultados tomando como base la unidad funcional de 1 MJ de bioetanol producido.

8.5.1. HUELLA DE CARBONO GLOBAL

La determinación de la huella de carbono se realizó mediante el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) totales en las etapas de generación de biomasa, transporte y transformación de biomasa para cada uno de los escenarios planteados (Ecuación 6).

Para expresar la huella de carbono de la generación de biomasa en $g CO_{2eq}/MJ_{bioetanol}$, se realizó el siguiente método: 1) conociendo el porcentaje de biomasa residual de bagazo y pencas con el que contribuye cada escenario; 2) se calculó el contenido de celulosa en 1 t de biomasa residual, para esto se tomó la composición determinada por el método de Van Soest (1991); 3) a continuación se determinaron los MJ de bioetanol que se producirían con el contenido de celulosa en 1t de biomasa residual de *A. tequilana* Weber (var. azul) tomando como referencia Sánchez et al., (2016)⁴⁵; 4) a partir del resultado anterior, se calcularon las t de biomasa residual necesarias para producir 1 MJ de bioetanol⁴⁶; 5) se multiplicó el resultado del paso 4 por la huella de carbono de bagazo o pencas según corresponda.

La huella de carbono de la generación de biomasa residual será, para el escenario 1, la huella del bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul), y para el escenario 2 la suma de la huella de pencas y bagazo.

⁴⁵ Para un contenido de 45% de celulosa.

⁴⁶ El valor del poder calorífico del etanol se obtuvo de:

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5462338&fecha=24/11/2016 publicado en el DOF (noviembre, 2016).

$$HC_{Total} \left[\frac{g \text{ CO}_2 \text{ eq}}{MJ} \right] = HC_{Total} \left[\frac{kg \text{ CO}_2 \text{ eq}}{t_b} \right] \times \left[\frac{t_B}{MJ} \right] \times FC \quad \dots [38]$$

Donde:

HC_{Total} Huella de carbono total de la cadena de producción de bioetanol a partir de biomasa residual de Agave tequilana Weber (var. azul) en $\frac{g \text{ CO}_2 \text{ eq}}{MJ}$.

HC_{Total} Huella de carbono total en $\frac{kg \text{ CO}_2 \text{ eq}}{t_b}$.

T_B Toneladas de biomasa residual.

FC Factor de conversión de g a kg; $\frac{1000 \text{ g CO}_2 \text{ eq}}{kg \text{ CO}_2 \text{ eq}}$.

8.5.2. HUELLA HÍDRICA GLOBAL

Para obtener la huella hídrica global de la producción de bioetanol se utilizó la ecuación 23, luego de calcular el consumo total de agua verde, azul y gris en las etapas de generación y transformación de biomasa para cada uno de los escenarios planteados. Al expresar la huella hídrica global en términos de la unidad funcional (en $L \text{ H}_2\text{O}/MJ_{bioetanol}$), después de calcular la huella hídrica se siguió el mismo método que para la huella de carbono global, quedando de la siguiente manera (ecuación 39):

$$HH_{Total} \left[\frac{L \text{ H}_2\text{O}}{MJ} \right] = HH_{Total} \left[\frac{m^3}{t_B} \right] \times \left[\frac{t_B}{MJ} \right] \times FC \quad \dots [39]$$

Donde:

HH_{Total} Huella hídrica total de la producción de bioetanol a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* en $\frac{g\ CO_2\ eq}{MJ}$.

HH_{Total} Huella hídrica total de la cadena de producción de bioetanol a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en $\frac{m^3}{t_B}$.

T_B Toneladas de biomasa residual.

FC Factor de conversión de m^3 a L; $\frac{1000\ L\ H_2O}{m^3}$.

8.5.3. INDICADORES SOCIALES GLOBALES

Los indicadores número de empleo e ingresos globales para la cadena de producción de bioetanol a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul), se calcularon con las ecuaciones 40 y 41:

$$NE_T = NE_{GB} + NE_{TB} + NE_{TrB} \quad \dots [40]$$

Donde:

NE_T Número de empleos totales generados durante la cadena de producción de bioetanol a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) $\left(\frac{número}{MJ}\right)$.

NE_{GB} Número de empleos generados durante la generación de biomasa residual $\left(\frac{número}{t}\right)$.

NE_{TB} Número de empleos generados durante el transporte de biomasa residual a la biorrefinería $\left(\frac{número}{t}\right)$.

NE_{TrB} Número de empleos generados durante la etapa de transformación de biomasa residual $\left(\frac{número}{t}\right)$.

Para expresar el número de empleos de la generación de biomasa residual en $número/MJ_{bioetanol}$, el método a seguir fue similar al utilizado en las huellas de carbono e hídrica.

Para conocer el ingreso global percibido durante la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana W. var azul*, se realizó el mismo método que para el número de empleos (ecuación 41).

$$I_{Total} = I_{GB} + I_{TB} + I_{TrB} \quad \dots [41]$$

Donde:

- I_{Total} Ingreso total percibido en la cadena de producción de bioetanol $\left(\frac{\$}{MJ}\right)$.
- I_{GB} Ingreso percibido en la generación de biomasa residual $\left(\frac{\$}{t}\right)$.
- I_{TB} Ingreso percibido durante el transporte de biomasa residual $\left(\frac{\$}{t}\right)$.
- I_{TrB} Ingreso percibido en la transformación de biomasa residual en bioetanol $\left(\frac{\$}{t}\right)$.

$$I_{Total} \left[\frac{\$}{MJ} \right] = I_{Total} \left[\frac{\$}{t_B} \right] \times \left[\frac{t_B}{MJ} \right] \quad \dots [41.1]$$

Donde:

- I_{Total} Ingreso total percibido en la cadena de producción de bioetanol $\left(\frac{\$}{MJ}\right)$.
- T_B Toneladas de biomasa residual.

8.5.4. INDICADORES ECONÓMICOS GLOBALES

Para calcular el costo total de producir bioetanol teniendo como materia prima biomasa residual de *A. tequilana* Weber (var. azul), se consideró los costos de generación, transporte y transformación de la biomasa (ecuación 42).

$$CPBE = CGB + CTB + CT_{r_{BE}} \quad \dots [42]$$

Donde:

CGB Costo de la generación de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul)
 $\left(\frac{\$}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

CTB Costo del transporte de la biomasa residual a la biorrefinería $\left(\frac{\$}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

CT_{r_{BE}} Costo de la transformación de la biomasa residual en bioetanol $\left(\frac{\$}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

La rentabilidad total se determinó para la suma de los costos utilizando la ecuación 43.

$$R_{PBE} = \frac{VBE - CPBE}{VBE} \times 100 \quad \dots [43]$$

Donde:

R_{PBE} Rentabilidad total de la producción de 1 MJ de bioetanol 2G (adimensional)

VBE Precio de venta de 1MJ de bioetanol $\left(\frac{\$}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

CPBE Costo total de producción de 1MJ de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) $\left(\frac{\$}{MJ \text{ bioetanol}}\right)$.

8.6. INTEGRACIÓN DE INDICADORES AMBIENTALES, SOCIALES Y ECONÓMICOS DE LA GENERACIÓN, TRANSPORTE Y TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA

La finalidad de integrar los indicadores medidos en este trabajo, es proporcionar un valor que englobe los ejes de la sostenibilidad antes descritos, es decir, un valor holístico que muestre el estado actual de los residuos agroindustriales de *A. tequilana* Weber (var. azul) y los puntos que deben tomarse en cuenta en caso de usarlos en la producción de bioetanol 2G.

La integración de indicadores, puede realizarse analítica, estadística o gráficamente, realizando primero una normalización de los indicadores es el proceso de transformación de unidades de medida.

Cuando las unidades indicadoras varían, la normalización se considera un paso necesario antes a la agregación (Nardo et al., 2005). La estructura de las evaluaciones de sostenibilidad se ha centrado en el paso de agregación (Pollesch y Dale, 2015; Langhans et al., 2014; Roberts, 2014; Zhou et al., 2006; Ebert y Welsch, 2004). Freudenberg (2003) ofrece una comparación de dos procedimientos de normalización diferentes en un resultado de evaluación compuesta. Recientemente existen evaluaciones de la sostenibilidad de biocombustibles sólidos construida mediante indicadores normalizados tal como el de Sacramento-Rivero (2022) cuya característica es que pueden adaptarse también a otros estudios de caso que involucren biocombustibles como es el caso del bioetanol.

Para evaluar la sostenibilidad de producir bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul), se propone integrarlos en gráficos con forma de ameba, los cuales se construyeron utilizando los valores normalizados de cada indicador de los componentes ambiental y socioeconómico evaluado en este trabajo.

Para lo anterior fue necesario adaptar el Marco metodológico de Sacramento-Rivero et al., (2022) para cada uno de los escenarios evaluados en el periodo 2012-2018, y así visualizar en qué áreas la sostenibilidad es mayor y en qué indicadores es necesario mejorar para que la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) sea sostenible.

La escala de sostenibilidad de dicho método está definida respecto a los límites planetarios y sostenibilidad absoluta, en este sentido, los indicadores normalizados tendrán un valor cercano o igual a cero en su mejor estado posible (sostenibilidad ideal) y serán iguales a uno cuando se encuentren en su valor “mínimo aceptable” (umbral de sostenibilidad). En esa escala, los indicadores normalizados con valores superiores a uno indican que no se ha alcanzado una meta de sostenibilidad.

Las variables y los cálculos involucrados para cada indicador se resumen en el ANEXO A.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de bioetanol 2G utilizando biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) resulta una propuesta tecnológica interesante desde diversos puntos de vista, principalmente porque podría integrarse a la cadena productiva del agave-tequila. Sin embargo, deben analizarse los posibles efectos económicos, ambientales, y sociales que podría tener esta nueva actividad. En este trabajo se realizó un estudio prospectivo de los posibles efectos del uso de la biomasa residual de agave como materia prima para la producción de etanol 2G en el contexto de la industria tequilera en México, en particular en el Estado de Jalisco.

A continuación, se muestran los resultados del cálculo de indicadores ambientales (huella de carbono y huella hídrica), sociales (número de empleos e ingreso) y económicos (rentabilidad) para evaluar la sostenibilidad del uso de biomasa de agave para producir etanol 2G. Se consideraron dos escenarios posibles: el escenario 1 toma en cuenta únicamente el uso del bagazo de agave proveniente de la producción de tequila como materia prima para la producción de bioetanol 2G, mientras que el escenario 2 integra el uso de pencas y bagazo para la producción de bioetanol 2G. El estudio considera las tres etapas de producción de bioetanol: (1) generación de biomasa, (2) transporte de biomasa a la biorrefinería, y (3) su transformación en bioetanol.

Primero, en la etapa de generación de la biomasa residual, se determinó el volumen de producción de pencas y bagazo mediante el índice de residuo (IR), así como los indicadores ambientales, sociales y económicos que van desde el establecimiento de la plantación, la jima del agave, y las etapas de producción de tequila en donde se genera el bagazo de agave. Posteriormente, se muestran los indicadores para la etapa de transporte de la biomasa a la biorrefinería.

Después, los indicadores de la etapa de transformación de biomasa en bioetanol bajo un esquema de biorrefinería de alimentación simple utilizando datos de literatura. Por último, se presenta la normalización e integración de los indicadores para el análisis e interpretación de la sostenibilidad del uso de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para producir bioetanol 2G bajo los dos escenarios evaluados.

9.1. ETAPA DE GENERACIÓN DE BIOMASA

En este trabajo se consideró como biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul), las pencas que constituyen el residuo agrícola generado en campo durante la jima, y el bagazo de agave que constituye el residuo agroindustrial generado en las fábricas que procesan las piñas para obtener el tequila. La primera actividad consistió en seleccionar los sitios de estudio en donde se presentará la mayor generación de biomasa mediante datos de actividad agrícola.

9.1.1. SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO Y TAMAÑO DE LA MUESTRA

Con los datos de producción agrícola e índice de residuo teórico, se identificó que los municipios de Atotonilco el Alto, Arandas y Amatitán en el Estado de Jalisco fueron los que mejor se aproximaron al criterio de selección. La Tabla 11 muestra las características generales de estos sitios de estudio.

Tabla 11. Descripción de los sitios de estudio seleccionados en el Estado de Jalisco, México.

Municipio	Coordenadas	No. De productores ¹	Rendimiento promedio (t/ha) ²	Superficie sembrada (ha) ¹	Temperatura promedio (°C)	Tipo de suelo predominante	Precipitación media anual (mm)	Elevación (msnm)
Atotonilco el Alto	Latitud 20° 30' N	398	118.7	9,438.9	18.8	Vertisol (47.8%) y Luvisol (31.4%)	900	1540-
	Longitud 102° 30' O							2255
Arandas	Latitud 20° 36' N	674	123.6	3,741.9	16.6	Luvisol (46%) y Planosol (31%)	919	1670-
	Longitud 102° 00' O							2370
Amatitán	Latitud 20° 42' N	609	85	3,959	21.9	Luvisol (46%) y Feozem (39.3 %)	938	620-2866
	Longitud 103° 37' O							

Fuente: <http://www.iieg.gob.mx/sicis/index.php>; ¹Información proporcionada por el Consejo Regulador del Tequila;

²Valor promedio de acuerdo con los datos del SIAP para los años 2003-2018.

La Zona de Denominación de Origen del Tequila (DOT) comprende 181 municipios distribuidos en los estados de Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas. De acuerdo con datos del SIAP para los años 2010-2015, en la Tabla 12 se presentan los diez municipios con la mayor superficie cosechada de agave, y por tanto los que tuvieron mayor generación de residuos de *Agave tequilana* Weber (var. azul), estos se encuentran en el Estado de Jalisco y, siguiendo este criterio, los municipios seleccionados para este estudio fueron los tres primeros: Amatitán, Atotonilco el Alto y Arandas con una generación anual de hasta casi 28,000 t de biomasa residual de Agave que incluye pencas y bagazo.

Tabla 12. Municipios con mayor generación de biomasa residual de *A. tequilana*, 2010-2015. Cálculos realizados con base en datos del SIAP, 2017.

Municipio	Biomasa residual (t biomasa seca/año)
Amatitán	26,777
Atotonilco el Alto	26,580
Arandas	21,572
Tequila	19,796
Jesús María	16,655
Ayotlán	13,794
Tepatitlán de Morelos	10,853
San Martín Hidalgo	8,197
Acatic	8,075
La Barca	6,023

En la Tabla 13 se muestra el rendimiento promedio de cultivos de *Agave tequilana* Weber (var. azul) así como el costo total de producción por hectárea sembrada. Como se expone en la tabla, los rendimientos determinados en campo mediante entrevistas a productores son menores al promedio obtenido de la base de datos del SIAP (2003-2018) reportados en la Tabla 12.

Tabla 13. Descripción de los cultivos de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en los sitios de estudio elegidos. Elaboración propia con datos determinados en campo y obtenidos de información proporcionadas por el CRT.

Municipio	Superficie sembrada (ha) ^a	Rendimiento promedio (t _{piña} /ha) ^b	Costo de producción (\$/ha) ^b	N° entrevistas realizadas
Amatitán	3,959	90.25	298,872	8
Atotonilco el Alto	9,439	74.17	323,503	6
Arandas	3,742	106	323,503	4

^a Información otorgada por el Consejo Regulador del Tequila (CRT); ^b obtenido de entrevistas a productores por municipio.

9.1.2. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RESIDUO (IR)

El índice de residuo se define como la cantidad de residuo que se genera por producto agrícola cosechado (kg/kg). Es un dato útil para estimar el potencial teórico de generación de biomasa residual al multiplicarlo por la producción agrícola. El cálculo del IR de pencas y bagazo en campo fue importante debido a que no se encontraron registros para *Agave tequilana* Weber (var. azul) de los sitios seleccionados y los datos existentes en literatura no eran metodológicamente claros.

Los índices de residuo calculados fueron específicos para el *Agave tequilana* Weber (var. azul) cultivado en los sitios de interés bajo las condiciones ambientales y factores de manejo agrícola propios de cada lugar (Tabla 14). Es conveniente resaltar que los valores difieren de los reportados en la literatura siendo 2.4 veces menor para pencas y 1.66 veces mayor para bagazo (Tabla 16). El resultado del IR se ve afectado por la edad del cultivo, las muestras colectadas en este estudio fueron para cultivos de 5 a 6 años.

Tabla 14. Índice de residuo (IR) calculado en este estudio para la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul).

Tipo de biomasa residual	Índice de residuo base seca ($t_{\text{residuo}}/t_{\text{cultivo}}$)
Hojas	0.05
Bagazo	0.20

En estudios como Pinos-Rodríguez et al. (2008) y Li et al. (2012) demostró que, dependiendo de la especie, edad del cultivo y la época del año donde se colecten las muestras, será el contenido de biomasa seca. Por ejemplo, el contenido de materia seca en las pencas de *A. salmiana* de 12 años es el doble que para *A. tequilana* (Pinos-Rodríguez et al., 2008). En cuanto a la estacionalidad, las muestras se colectaron justo después de la época de lluvia (octubre), y debido al metabolismo ácido crasuláceo del *Agave tequilana* Weber (var. azul), las plantas tienden a almacenar altas concentraciones de agua, lo que puede explicar porqué el contenido de materia seca en las muestras colectadas en este trabajo fue menor en comparación con lo reportado en literatura (Corbin et al., 2015; Jiménez-Muñoz et al., 2016).

La determinación del IR en campo fue útil para calcular el potencial de biomasa residual de pencas y bagazo de agave disponible en los sitios de estudio (Tabla 14). El volumen total estimado de biomasa residual para los tres municipios seleccionados no rebasa las 70,000 toneladas anuales de materia seca. Este volumen de biomasa es mucho menor al volumen requerido para lograr un costo de producción de bioetanol 2G competitivo, que se ha calculado en 165,000 toneladas de materia seca anuales, lo que equivale a 500 toneladas/día (Sánchez et al., 2013). Por tanto, la biomasa de estos tres municipios podría sumarse para alimentar a una única planta de producción de bioetanol 2G, con una capacidad entre 100 a 200 toneladas/día.

Tabla 15. Producción de biomasa residual de agave (hojas y bagazo) estimado con datos de campo.

Municipio	Biomasa residual ^a (t biomasa seca/año)
Amatitán	7,220
Atotonilco el Alto	5,006
Arandas	55,650

^a Para el dato de producción de agave, se tomó la superficie cosechada correspondiente al año 2017 de datos del SIAP, y los rendimientos de datos obtenidos en campo.

La composición de la biomasa residual de pencas y bagazo de piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) se muestra en la Tabla 16. En general el contenido de azúcares (celulosa y lignina), resultó mayor para bagazo, resaltando el contenido de celulosa que fue superior en ambos residuos pencas y bagazo (de 19% a 34% del total). Por último, las pencas son el residuo con mayor contenido de compuestos solubles (60%) que son los compuestos que le dan resistencia, color, densidad y la capacidad de absorber humedad (higroscopicidad) (Bonilla-Chabes, 2014; Hidalgo-Reyes *et al.*, 2015).

El contenido de celulosa y hemicelulosa en las pencas de *A. tequilana* Weber (var. azul) analizadas fue menor que en otros estudios, mientras que el contenido de lignina de las pencas de *Agave tequilana* es similar a otros estudios (Li, 2012; Corbin, 2015; Rijal *et al.*, 2016).

En la composición del bagazo, el contenido promedio de lignina es mayor que el de otras materias primas como el bagazo de caña de azúcar (26 % *versus* 20% reportado en Barrera *et al.*, 2016). Esto podría tener como consecuencia menores rendimientos de obtención de bioetanol, o bien, mayores requerimientos energéticos para su pretratamiento (Rastogi y Shrivastava, 2017).

En cuanto al contenido de humedad de las distintas muestras de bagazo de la producción de tequila analizadas, en el ANEXO E, Tabla E3 se muestra que en promedio es del 50%. Esto puede deberse principalmente a la cantidad de agua utilizada en la cocción de las piñas, la carga en cada horno y la eficiencia de la molienda para separar el jugo que será fermentado de las fibras de la piña cocida dando lugar al residuo de bagazo.

Tabla 16. Compuestos lignocelulósicos de la biomasa residual (bagazo y hojas) de *Agave tequilana* Weber (var. azul) colectadas en campo.

Municipio	Bagazo (% en peso seco)			
	Comp. Solubles %	Hemicelulosa %	Celulosa %	Lignina %
Atotonilco	31	12	30	27
Amatitán	32	13	34	20
Arandas	29	12	29	30
Pencas				
	Comp. Solubles %	Hemicelulosa %	Celulosa %	Lignina %
Atotonilco	57	9	20	14
Amatitán	63	9	19	11
Arandas ^a	60	9	20	13

^aNota: no calculado. Se tomó como un promedio de los valores cuantificados.

9.1.3. INVENTARIO DE EMISIONES DE GEI EN EL CULTIVO DE *Agave tequilana* Weber (var. azul)

El cultivo del *Agave tequilana* Weber (var. azul) en los municipios seleccionados, se realiza de forma manual y mecanizada, con o sin uso de agroquímicos, esto depende de cada agricultor, lo que no cambia es que se divide en cuatro etapas: preparación del terreno, plantación, mantenimiento del cultivo y jima.

Los datos obtenidos de las entrevistas semi estructuradas fueron útiles para elaborar un inventario de las prácticas agrícolas realizadas durante el cultivo de *A. tequilana* Weber (var. azul), tales datos fueron la base del cálculo de las emisiones GEI por etapa de cultivo y posteriormente de la huella de carbono. Como resultados de dicho inventario resaltan los rendimientos de cultivo, las dosis de fertilizantes nitrogenados, el manejo de residuos en campo y las dosis de aplicación de plaguicidas por mencionar algunos (ANEXO F, Tabla F1). En la Tabla 17 y Tabla 18 se presenta un resumen de datos relevantes como el uso de agroquímicos, maquinaria, así como el gasto de combustible por etapa de cultivo.

Tabla 17. Inventario de prácticas agrícolas para el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para el ciclo mayo de 2012 a abril de 2018.

Municipio	Sitio	Rendimiento total (t/ha)	Nitrógeno aplicado (kg/ha)	Quema de residuos	Plaguicidas aplicados (kg/ha)			Gasto diésel (L/ha)	Dosis de cal (kg/ha)
					Herbicidas	Fungicidas	Insecticidas		
Amatitán	1	78	0	Si	2.5	3.9	0	175	400
	2	75	675	A veces	7.5	0	1	1,192	0
	3	120	4,000	No	0	0	0	499	0
	4	60	483	Si	12	8	2	178	0
	5	70	6	No	18.3	0	0	160	0
	6	100	160	A veces	2.5	8	8.5	180	0
	7	99	296	No	26.9	0	9	299	0
	8	120	30	No	7	0	1	236	15
Atotonilco el Alto	1	75	659	La mitad	14	0	0	162	750
	2	70	1,175	No	13	12	0	406	0
	3	60	937	No	10.5	8	8	0	0
	4	100	529	A veces	26.5	5.5	6	270	0
	5	70	5,340	Si	12	0	2	198	0
	6	70	920	Si	15	0	1	144	0
Arandas	1	70	4,690	Si	5	21	1	114	0
	2	120	608	Si	16	0	1	189	5,000
	3	120	207	Si, el 10%	10	1	1	198	0
	4	114	154	No	12	0	9	176	0

Tabla 18. Uso de maquinaria y consumo de combustible en el cultivo de *A. tequilana* Weber (var. azul) durante el periodo mayo 2012 – abril 2018.

Sitio	Etapa/actividad	Maquinaria	Consumo de combustible (L/ha)	Número de veces en que realiza la actividad
Amatitán	Preparación del terreno	Tractor	70	4
	Plantación	Manual	0	1
	Mantenimiento	Tractor	24	7
	Jima ¹	Manual y tractor con pala	24	4
Atotonilco el Alto	Preparación del terreno	Tractor	58	3
	Plantación	Manual	0	1
	Mantenimiento	Tractor	18	3
	Jima ¹	Manual y tractor con pala	15	3
Arandas	Preparación del terreno	Tractor	52	4
	Plantación	Manual	0	0
	Mantenimiento	Manual	0	0
	Jima ¹	Manual y tractor con pala	18	5

¹El corte de las pencas se realiza manualmente con una coa, la carga de las piñas al camión que las llevará a la tequilera es realizada utilizando un tractor, ver Figura 13.

Después de transportar las piñas a la tequilera, estas se cortan manualmente para después pasarlas a hornos de mampostería o industriales donde son cocidas con vapor de agua, posteriormente pasan al proceso de molienda para extraer el jugo que será fermentado para la producción de tequila. En cuanto al uso del bagazo generado en las tequileras, en las entrevistas se obtuvo que hay quienes pagan para que terceros se lleven el residuo a centros de acopio donde se realiza la disposición final del bagazo, en palabras de un entrevistado “*Pagan para que se lo lleven, se quitan el problema*”. Otros comentan que lo usan para realizar composta que posteriormente aplican en los cultivos de agave, sin embargo, el volumen es muy grande y es difícil darle un manejo adecuado a todo el bagazo que se genera cada vez que se produce tequila.



Figura 13. Proceso de jima de las piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul). A) jima, b) acercamiento de piñas al punto de recolección usando animales de carga, c) carga a los camiones para transportar a la tequilera utilizando tractor pala. Morales García, 2017.

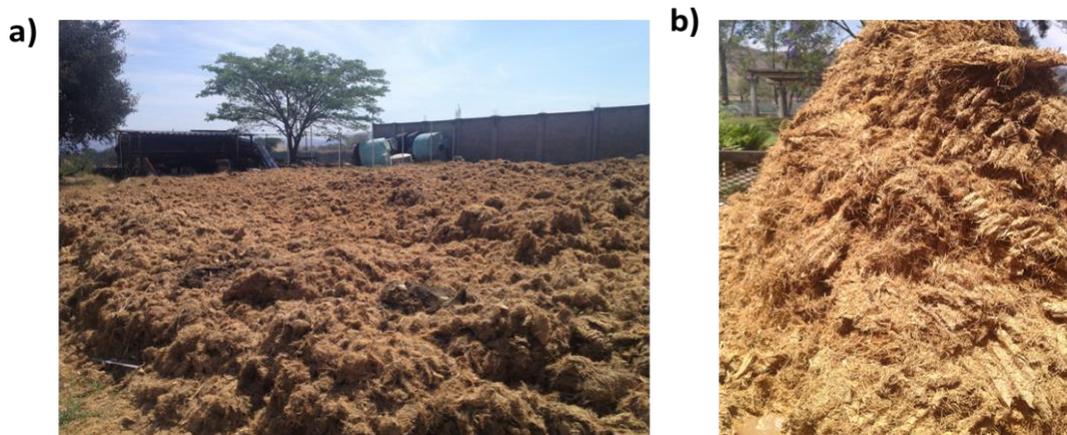


Figura 14. Pilas de bagazo en tequileras: a) Tequileras en Amatitán; b) Tequileras en Atotonilco el Alto. Valdez Vazquez, 2018.

9.1.4. HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE GENERACIÓN DE BIOMASA

Las Huellas de carbono se presentan en términos de toneladas de CO₂ eq por hectárea y de toneladas de CO₂ eq por tonelada de piña para la fase agrícola, posteriormente las emisiones GEI se transformaron en términos de la unidad funcional (MJ) de acuerdo con lo descrito en la sección **Error! Reference source not found.** para la suma de la huella de carbono correspondiente a cada etapa de la cadena de valor de la producción de bioetanol 2G.

Las emisiones de GEI del cultivo de *A. tequilana*, se calcularon sumando las emisiones originadas por la descomposición de residuos y aplicación de fertilizantes nitrogenados, uso de maquinaria, uso de plaguicidas, quema de residuos y aplicación de cal de acuerdo con la metodología de Ali *et al.*, (2017) y los factores de emisión nivel 1 del IPCC (2006 y 2019, respectivamente). En cuanto a las emisiones de CO₂ que podrían estar asociadas a la extracción y transporte de agua para riego, se asumen como cero debido a que el cultivo de agave no requiere de este recurso para su crecimiento⁴⁷, es decir, las plantaciones son de temporal.

⁴⁷ En este sentido, se considera al agave como una planta altamente productiva que respondería favorablemente a las condiciones de sequía generadas a causa del cambio climático para la producción de bioenergía (Steward, 2015).

Específicamente para la producción agrícola de agave, respecto a los dos escenarios estudiados, es decir, el escenario 1 donde se toma únicamente la biomasa de bagazo manteniendo las prácticas agronómicas actuales del cultivo, se encontró que las emisiones GEI van de 25.6 t CO₂ eq/ha a 37.7 t CO₂ eq/ha. Estas emisiones son dos veces mayores en comparación con el escenario 2 que considera la biomasa de pencas y bagazo (Figura 15). Esto quiere decir que, al usarse la biomasa de las pencas para la producción de bioetanol, las emisiones GEI asociadas a la quema de las pencas provenientes de la jima del agave se reducirían en al menos un 50% por realizar esta acción a nivel agrícola y puede impactar en las emisiones asociadas a la producción de bioetanol.

Como se observa por sitio, las emisiones GEI para Arandas son mayores que para Amatitán y Atotonilco el Alto, esto se debe a que en la mayoría de los casos se realiza la práctica de quema de las pencas en la etapa de jima previo a la preparación del terreno, además de las emisiones asociadas a la desnitrificación de las pencas, a pesar de que en promedio la aplicación de nitrógeno es menor que en Atotonilco (1415 kg/ha *versus* 1593 kg/ha), la quema de residuos en campo la realizan en menor proporción que en Arandas (**Error! Reference source not found.**). Las emisiones GEI promedio van de 209 t CO₂ eq a 244 t CO₂ eq por tonelada de agave para el escenario 1 y de 66 t CO₂ eq a 79 t CO₂ eq por tonelada de agave tal como se observa en la **Error! Reference source not found.**, dichas emisiones están relacionadas con los rendimientos obtenidos en cada cultivo dependiendo del sitio de estudio.

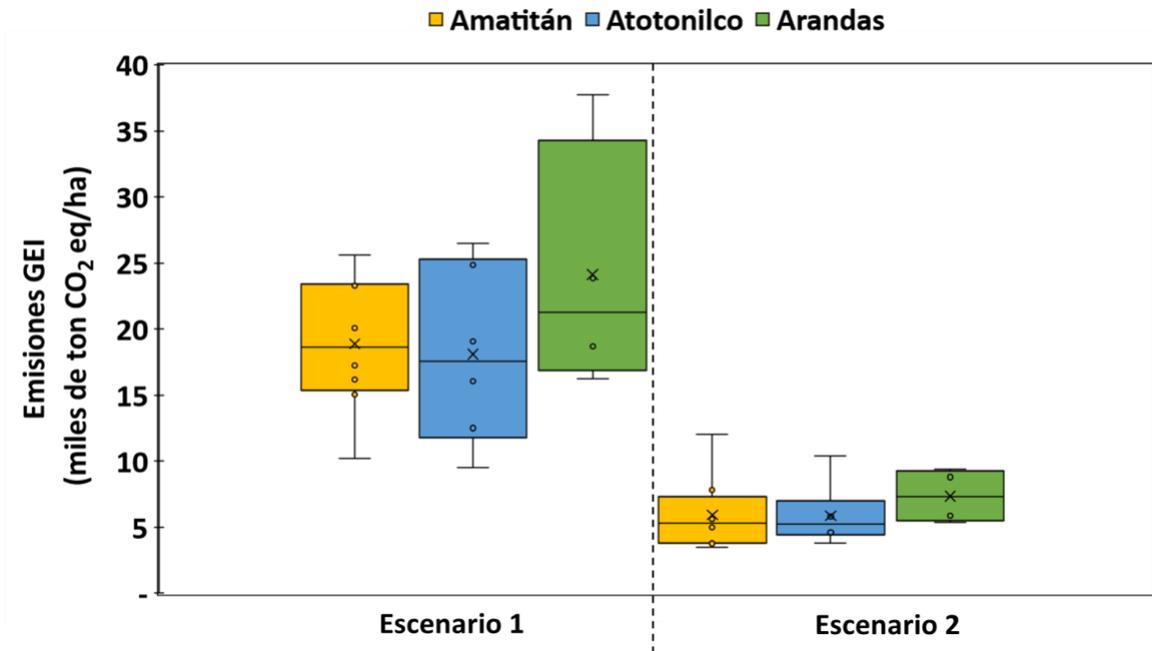


Figura 15. Comparación de emisiones totales de GEI del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) entre los dos escenarios evaluados para este estudio.

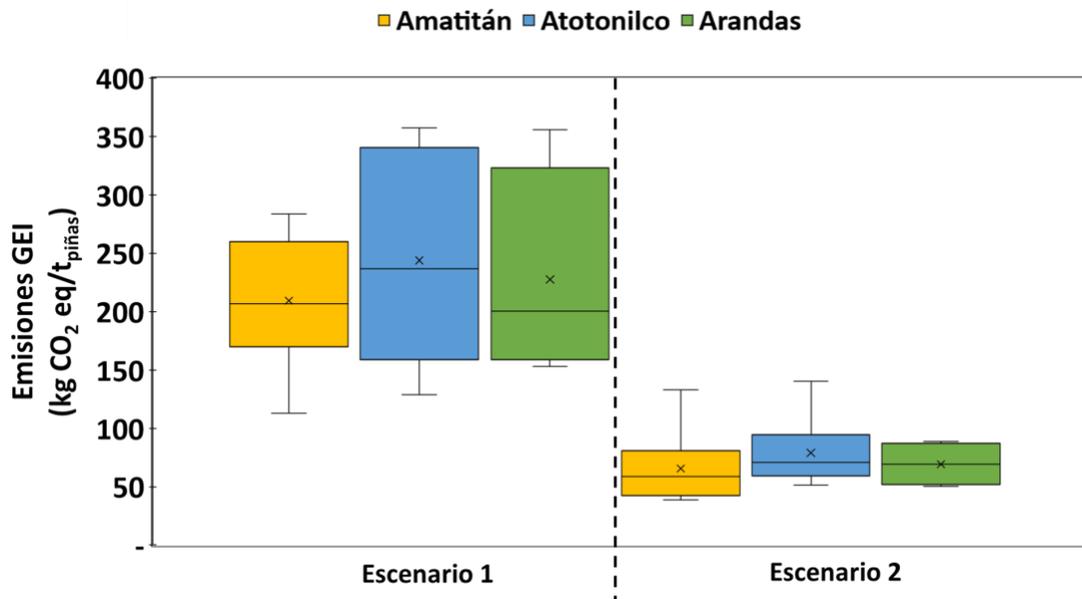


Figura 16. Comparación de emisiones de GEI por tonelada de *Agave tequilana* Weber (var. azul) entre los dos escenarios evaluados para este estudio.

La Figura 17 muestra la distribución de emisiones GEI por etapa de cultivo, encontrando que en el Escenario 1 las etapas que contribuyen en mayor medida a las emisiones son la jima que representan de 56.7% a un 66.5%, la preparación del terreno contribuye con un 24.9% a un 28.8% seguido por el mantenimiento del cultivo con un 6.8% a 12.8%. La jima contribuye mayoritariamente con las emisiones debido a que, al cortar las pencas, éstas se dejan en campo donde sufren un proceso de desnitrificación aunado a que, en la mayoría de los casos, tales residuos (secos) se queman antes de realizar la preparación del terreno (**Error! Reference source not found.**).

La quema de estas pencas emite de 4.3 t CO₂ eq/ha a 6.6 t CO₂ eq/ha en promedio en los cultivos evaluados. De reducir esta práctica para utilizar la biomasa residual como materia prima en la producción de etanol, vemos que se tendría un impacto positivo en la reducción de GEI originados por esta labor y representaría un beneficio extra en la cadena productiva Agave-Tequila desde el punto de vista ambiental de la agroindustria, ya que de acuerdo con la página del Consejo Regulador del Tequila (CRT), actualmente existe un Organismo de Certificación de Verificación y validación de Gases de Efecto Invernadero, esta es una estrategia que puede aportar a mecanismos de reducción de GEI desde el cultivo de la materia prima.

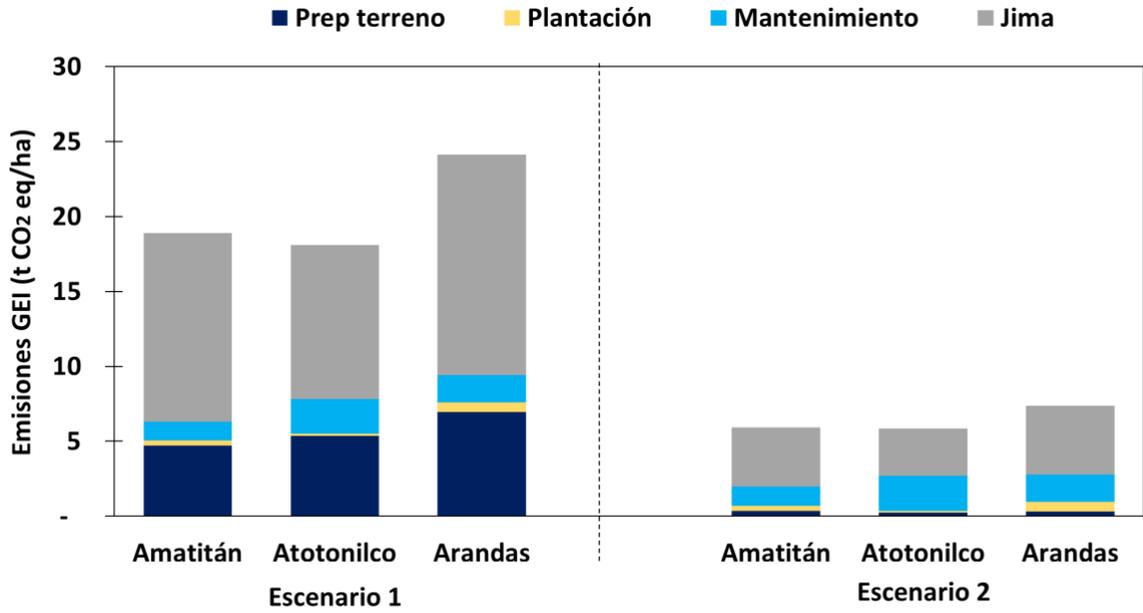


Figura 17. Distribución promedio de las emisiones totales de GEI del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) por etapa en los escenarios evaluados.



Figura 18. Quema de residuos de pencas de agave, una práctica que contribuye con emisiones de GEI en el cultivo de *A. tequilana* Weber (var. azul). Morales García, 2017.

La actividad que contribuye en segundo lugar con emisiones GEI, es la preparación del terreno debido al uso de maquinaria agrícola, sin embargo, no se compara con las emisiones de la quema que son las que más aportan a este rubro (alrededor del 90% para los tres sitios de estudio). Las emisiones en la etapa de mantenimiento del cultivo se deben principalmente a la aplicación de fertilizantes nitrogenados y plaguicidas, por lo cual, estas permanecen iguales en ambos escenarios: 1.2 t CO₂ eq/ha a 2.3 t CO₂ eq/ha. La plantación del *A. tequilana* es la actividad que genera las menores emisiones durante el cultivo, ya que esta se realiza manualmente.

Después de calcular las emisiones GEI totales del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para cada sitio de estudio, se prosiguió con el cálculo de la huella de carbono para los Escenarios 1 y 2 del cultivo de *A. tequilana* Weber (var. azul).

En la **Error! Reference source not found.** panel izquierdo, se muestran las emisiones GEI por tonelada de biomasa para el Escenario 1 para el cultivo convencional de *Agave tequilana* Weber (var. azul) donde el impacto de las emisiones se asigna a las piñas por ser el único producto de interés y que actualmente cuenta con un costo económico, los valores de HC varían de 216 kg CO₂ eq/t de piñas a 241 kg CO₂ eq/t de piñas. En la Figura 19 panel derecho, se muestra las emisiones GEI por tonelada de biomasa para el Escenario 2, aquí la asignación de impactos se distribuye entre las piñas para producción de tequila y las pencas para producción de bioetanol. Las emisiones GEI en el Escenario 2 va de 91.6 kg CO₂ eq/t a 106.4 kg CO₂ eq/t biomasa residual, donde en todos los casos la asignación de impactos corresponde a un 69.6 % del total a las piñas y un 30.4% a las pecas, es decir que el residuo de pencas tiene una huella de carbono baja (27.8 kg CO₂ eq/t a 32.3 kg CO₂ eq/t) comparada con las emisiones GEI de paja de trigo y rastrojos de maíz reportadas por Arellano-Hernández, (2019) de 60 kg CO₂ eq/t.

Las diferencias existentes entre las emisiones de los sitios evaluados en este trabajo, pueden deberse principalmente a la variación de las prácticas agrícolas realizadas en cada uno tal como se observa en los inventarios de emisiones GEI antes presentados. En comparación con lo reportado por Arellano-Hernández, es probable que las emisiones sean diferentes debido a la

fisiología de ambos cultivos, su manejo agrícola (cantidad de insumos requeridos) y al tiempo de desarrollo de cada uno, en el caso del maíz y trigo esto lleva unos meses, mientras que el agave tarda años en desarrollarse.

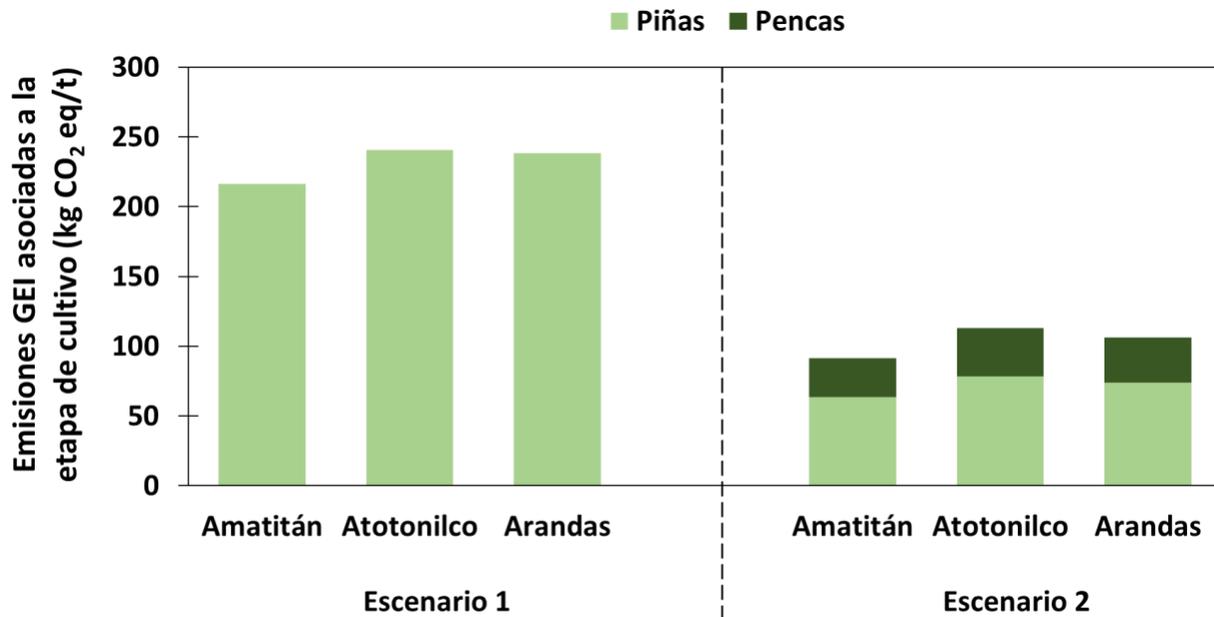


Figura 19. Emisiones GEI promedio asociadas al cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) con asignación de impactos para los escenarios evaluados.

Siguiendo la cadena de producción del tequila, debemos recordar que las piñas obtenidas en campo son transportadas para su conversión en tequila, durante el transporte de esta materia prima se generan emisiones GEI que contribuyen con la etapa de generación de biomasa. Las emisiones y, por tanto, la huella de carbono del transporte de piñas depende de la distancia recorrida entre el campo de cultivo y el “pie de fábrica”. En la Tabla 19 se muestran los resultados de la HC de esta actividad, la cual se realiza por carretera en camiones con capacidad de carga de 20 t por viaje realizado. Como se mencionó previamente, se tomó como sitio de producción del tequila, al municipio de Tequila, Jalisco por ser la zona donde se produce el mayor volumen de tequila, además que en este lugar se ubican las tequileras más grandes de toda la zona de DOT.

Tabla 19. Emisiones GEI promedio asociadas al transporte de piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) al sitio de producción de tequila.

Trayecto	Rendimiento (t piña/día) ^a	Distancia (km)	Emisiones GEI (kg CO₂ eq/t piña)^a
Amatitán – Tequila	219	12	8.5
Atotonilco el Alto – Tequila	171	160	88
Arandas – Tequila	610	192	377

^a En base húmeda

Luego de ser transportadas, las piñas se procesan para la producción de tequila, y tal como se indicó anteriormente, en dicho proceso se generan GEI relacionados con el consumo de electricidad y combustibles dentro de la tequilera. Las emisiones correspondientes a tal proceso se calcularon utilizando lo reportado en literatura tomando como valor final 92.86 kg CO₂ eq/t piña. Para obtener el valor de las emisiones del bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) se sumaron las emisiones asociadas a las piñas en el cultivo de agave más las emisiones del transporte y procesamiento de piñas, el valor promedio obtenido en el Escenario 1 fue 13 kg CO₂ eq/t biomasa y en el Escenario 2 de 19 kg CO₂ eq/t biomasa (Tabla 20).

Tabla 20. Emisiones GEI promedio de la etapa de generación de biomasa residual de *A. tequilana* Weber var. azul, con asignación de impactos calculada para los sitios de estudio.

Sitio	Emisiones GEI (kg CO ₂ eq/t biomasa)			
	Escenario 1		Escenario 2	
	Bagazo	Bagazo	Pencas	Total E2
Amatitán	8.6	4.5	6.1	10.6
Atotonilco el Alto	11.4	7.00	5.8	12.8
Arandas	19.2	14.8	19.7	34.5

Tabla 20a. Emisiones GEI promedio de la etapa de generación de biomasa residual de *A. tequilana* Weber var. azul, referida a la unidad funcional (1 MJ etanol) utilizada en este estudio.

Sitio	Emisiones GEI (kg CO ₂ eq/MJ)	
	Escenario 1	Escenario 2
Amatitán	0.0024	0.0033
Atotonilco el Alto	0.0036	0.0043
Arandas	0.0063	0.0122

El valor de las emisiones en la etapa de producción de biomasa para ambos escenarios es mucho menor que los reportados por Arellano-Hernández (2018) para rastrojos de maíz y paja de trigo (60 kg CO₂ eq/t) esto debido a los rendimientos en el cultivo, mientras que para cereales (trigo y maíz) los rendimientos van de 6.5 t cultivo/ha 12 t cultivo/ha, para agave los rendimientos llegan hasta a 106 t agave/ha. Los valores aquí presentados no incluyen la producción de bioetanol.

9.1.5. HUELLA HÍDRICA EN LA GENERACIÓN DE BIOMASA

El uso de agua en la producción de biocombustibles se ha convertido en un tema oportuno puesto que todos los procesos involucrados en su obtención requieren de este recurso de manera directa o indirecta. En la literatura, se sugiere que el consumo de agua dependerá de la materia prima utilizada para su producción (Gerbens-Leenes, 2017; Mathioudakis *et al.*, 2017).

Para el presente estudio, al igual que en la huella de carbono, se calculó la huella hídrica de las diferentes etapas de la producción de bioetanol 2G utilizando biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para evaluar qué tan conveniente es utilizarla como materia prima. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las huellas verde y gris en la etapa de generación de biomasa, los valores se presentan en términos de m³ por hectárea y por tonelada de biomasa para la fase agrícola, posteriormente se transformaron en términos de la unidad funcional (MJ) de acuerdo con lo descrito en la sección **Error! Reference source not found.**

A partir de la comparación entre la ET_c y P_{eff} se obtuvo el consumo de agua verde el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) desde su plantación hasta la jima. En la Figura 20 se muestra la variación del consumo de agua verde por hectárea a través de los seis años evaluados para este cultivo.

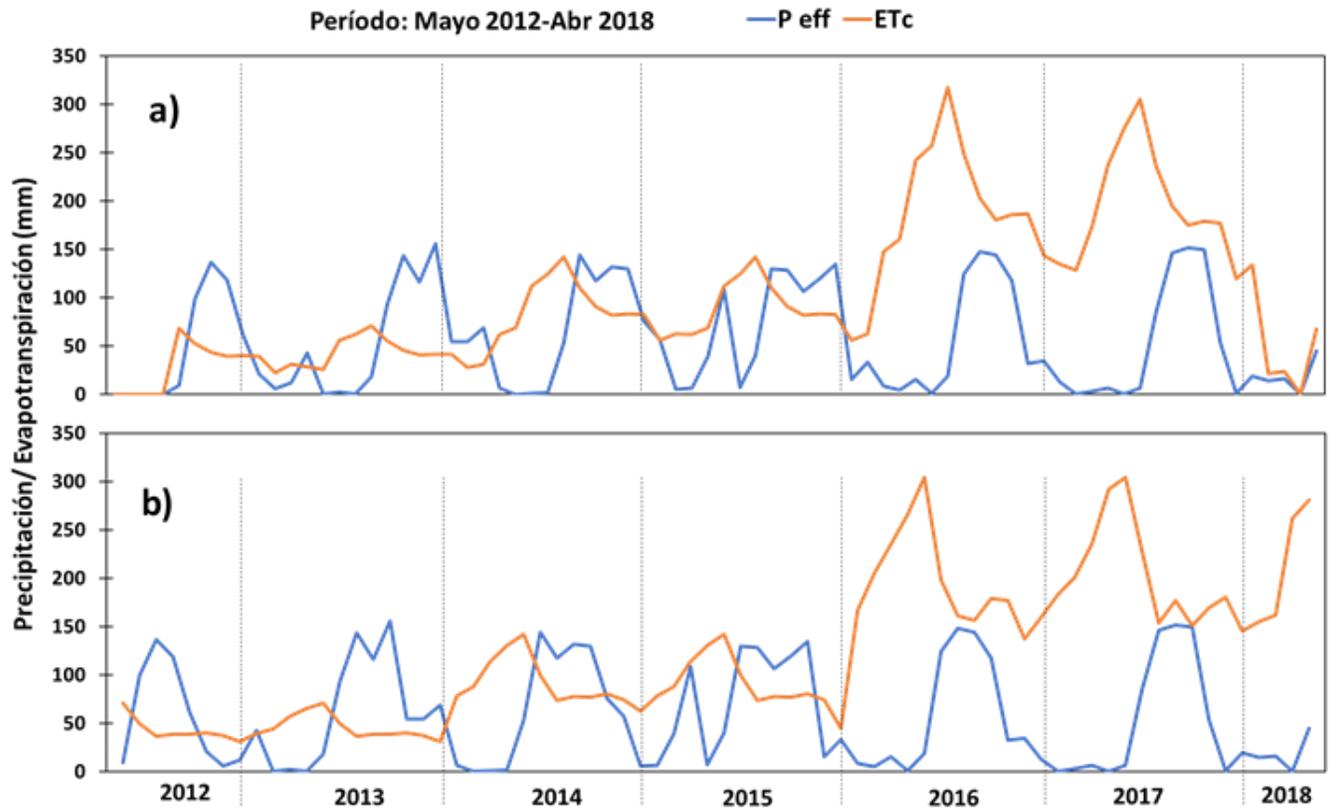


Figura 20. Precipitación efectiva (Peff) versus evapotranspiración del cultivo (Etc) de *A. tequilana* Weber (var. azul) durante el período evaluado. A) Amatitán; b) Atotonilco el Alto y Arandas. Elaboración propia con datos del SMN y del software CROPWAT 8.0 (FAO).

Durante los primeros dos años de crecimiento del cultivo, es notorio que la precipitación efectiva alcanza a cubrir las necesidades de agua de la planta, aunque durante los meses con menor precipitación efectiva es la ET_c la que cubre tales requerimientos, sin embargo, a partir del tercer año de crecimiento probablemente por la etapa fenológica del *Agave tequilana* Weber (var. azul), la sumatoria del consumo de agua verde corresponde a la precipitación efectiva, esto es más notorio a partir del cuarto año de establecida la plantación.

Es conveniente mencionar que por el tipo de metabolismo del género agave (metabolismo ácido crasuláceo), estas plantas tienen una alta eficiencia del uso de agua ya que la absorción de CO_2 la lleva a cabo durante la noche (Nobel y Sanderson, 1984; North y Nobel, 1988; Nobel 1994; Stewart, 2015).

Asimismo, cuando plantas del género agave se enfrentan a estrés hídrico almacenan mayores concentraciones de CO₂ que a su vez almacena azúcares en el tallo, el cual posteriormente se transforma en azúcares en la piña que sirve como materia prima en la industria del tequila.

El consumo de agua total se muestra en la Figura 21, como se observa, el consumo de agua verde representa entre el 88% y el 96% del total. En relación con el agua verde debe mencionarse que, por la fisiología de la planta, cuando el suelo no tiene suficiente humedad las raíces pueden contraerse para minimizar la pérdida de agua, y en eventos de lluvia corta tienen la capacidad de generar raíces finas que permiten una rápida acumulación de agua (Nobel y Sanderson, 1984; North y Nobel, 1988; Nobel 1994; Stewart, 2015). Basándonos en estas características y tomando en cuenta la asignación de impactos, el bajo consumo de agua en la generación de la biomasa residual agrícola de *Agave tequilana* Weber (var. azul) resulta una alternativa interesante para su uso en la producción de bioetanol 2G, especialmente en sitios donde los recursos hídricos son bajos.

El consumo de agua gris en los casos analizados va de 8.2 m³/ha a 27 m³/ha. Cabe recalcar que los valores tan bajos pueden relacionarse con que no se tomó en cuenta otros contaminantes como fósforo y los plaguicidas aplicados durante el cultivo de *A. tequilana* Weber (var. azul).

Para la producción de tequila, la huella hídrica azul por tonelada de agave procesado hasta la molienda donde se genera el bagazo es de 1.36 m³/t, en la Tabla 21 se presenta la huella hídrica total de la etapa de generación de biomasa con la asignación de impactos.

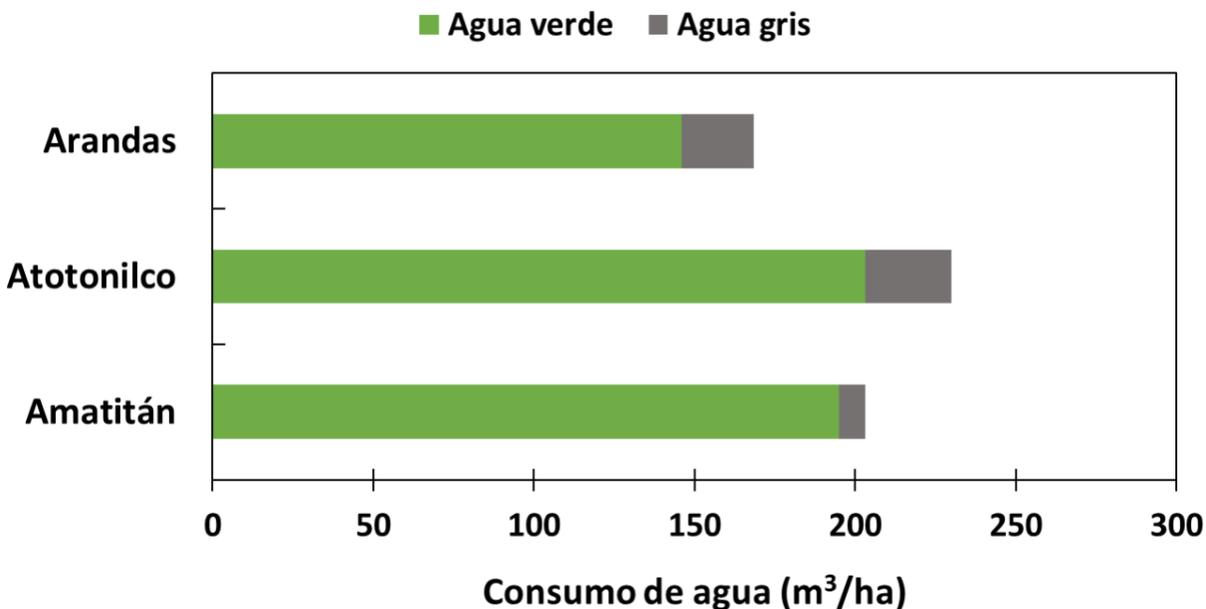


Figura 21. Consumo de agua total del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para el período evaluado (fase agrícola). El agua azul fue igual a cero debido a que el cultivo no requiere irrigación.

Tabla 21. Huella hídrica de la etapa de generación de la biomasa residual de *A. tequilana* Weber (var. azul) con asignación de impactos para los escenarios evaluados.

Sitio	Huella hídrica (m ³ H ₂ O /t biomasa)			
	Escenario 1		Escenario 2	
	Bagazo	Bagazo	Pencas	Total E2
Amatitán	0.10	0.10	1.07	1.17
Atotonilco el Alto	0.13	0.12	1.38	1.50
Arandas	0.09	0.09	0.78	0.87

Tabla 21a. Huella hídrica de la etapa de generación de la biomasa residual de *A. tequilana* Weber (var. azul) referida a la unidad funcional (1 MJ etanol) utilizada en este estudio.

Sitio	Huella hídrica (L H ₂ O/MJ)	
	Escenario 1	Escenario 2
Amatitán	0.03	0.36
Atotonilco el Alto	0.04	0.51
Arandas	0.03	0.31

9.1.6. CÁLCULO DE INDICADORES SOCIALES EN LA ETAPA DE GENERACIÓN DE BIOMASA

Dado que la agroindustria del tequila representa el sustento de miles de personas, para que la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) sea sostenible, deben considerarse criterios como la creación de empleos que fortalezcan las condiciones laborales en esta cadena productiva a nivel regional (Leclert, 2007; Hernández-López, 2012; Hernández-López, 2014). En la Tabla 22 aparecen los resultados del número de empleos y salario de los escenarios evaluados para el uso de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en la producción de bioetanol 2G. El número de empleos asociados a la generación de la biomasa residual para el Escenario 1 recaen en la recolección, manejo y traslado del bagazo de la tequilera a la biorrefinería (Tabla 22), mientras que en el Escenario 2 estos empleos se generarían desde la recolección, carga y transporte de las pencas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) generadas en campo hacia la biorrefinería sumadas a la recolección de bagazo en la tequilera.

Tabla 22. Número de empleos y salarios en la etapa de generación de biomasa residual de *A. tequilana* Weber (var. azul).

Sitio	Escenario 1		Escenario 2	
	Número de empleos (número/t bs ^a)	Salario (\$/t bs)	Número de empleos (número/t bs)	Salario (\$/t bs)
Amatitán	2	2.7	6	22.2
Atotonilco el Alto	3	4.2	8	38.5
Arandas	2	2.6	5	22.6

^a tonelada de biomasa seca

Para calcular los indicadores sociales, se tomaron como base la distribución de empleos y salarios que existe actualmente en el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) y la producción de tequila, los resultados se muestran con base en las entrevistas realizadas en campo. En la fase agrícola de producción de *Agave tequilana* Weber (var. azul), los trabajos son realizados por “cuadrillas”, es decir, grupos de personas calificadas para realizar un trabajo por jornal en específico tal como la plantación/arranque⁴⁸ de los hijuelos, el mantenimiento de las plantas, la aplicación de fertilizantes y la carga de piñas al camión, aquí la labor más especializada es la jima, puesto que el corte de las pencas requiere de habilidad y rapidez para dejar la piña limpia y lista para ser transportada a la tequilera, los jimadores son personas extras de las cuadrillas; aunado a estos se encuentran los tractoristas que realizan las operaciones de preparación del terreno y los transportistas que llevan los camiones cargados de piñas a la tequilera.

Los salarios varían de acuerdo con la labor que cada persona desempeña dentro de la producción agrícola de *Agave tequilana* Weber (var. azul), mientras que los tractoristas tienen un salario de \$250 o \$300, el jornal varía de \$200 a \$250 diarios mientras realiza sus labores que pueden ser permanentes o temporales dependiendo de la época del año y la actividad que realicen dentro del cultivo, a los plantadores/arrancadores se les paga entre 50 centavos y \$1 por hijuelo plantado/arrancado, finalmente los jimadores ganan de 20 a 40 centavos por kg jimado dependiendo de las condiciones del terreno (si es plano o se encuentra en laderas), en las entrevistas se reveló que un jimador realiza el corte de entre 3 y 4 t diarias, y se necesitan de 5 a 10 jimadores para realizar esta labor en 1 ha de cultivo.

Ya en la tequilera, las actividades están más enfocadas a la operación de recepción, corte, cocción y molienda de piñas para extraer el jugo que será fermentado, en esta operación es donde se genera el bagazo (Figura 22).

⁴⁸ A partir del tercer año de crecimiento de la planta comienzan a nacer los hijuelos, los arrancadores se encargan de retirarlos de la planta madre para posteriormente realizar una clasificación que les permite elegir a los mejores para establecer nuevas plantaciones o venderlos.



Figura 22. Troceado de piñas, hornos de cocción y fibras de bagazo como parte del proceso de producción de tequila. Morales García, 2018.

Los empleos con potencial de generarse en el ámbito de la producción de bioetanol 2G, representarían una mejora en la producción de *Agave tequilana* Weber (var. azul), puesto que los trabajos temporales existentes en el área agrícola podrían transformarse en permanentes e incluso generar nuevos empleos enfocados únicamente en la recolección de la biomasa en campo. En cuanto a los salarios, un beneficio regional para los agricultores del agave es que dichos salarios podrían aumentar como consecuencia del valor agregado a la biomasa residual, provocando una diversificación económica atribuida a la producción de bioetanol (IEA, 2010; Walter *et al.*, 2011).

9.1.7. CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS EN LA ETAPA DE GENERACIÓN DE BIOMASA

Los indicadores económicos en la etapa de generación de biomasa residual están relacionados con los costos del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) y la producción de tequila. Conocer el costo actual de generar la biomasa residual tanto de pencas como de bagazo como un subproducto, resulta interesante puesto que, a partir de estos podría fijarse el precio de venta de esta biomasa dadas las condiciones actuales del mercado de las piñas de *A. tequilana* Weber (var. azul).

Los resultados del valor económico asignado a la biomasa residual de pencas y bagazo se encuentran en la Tabla 23, recordemos que estos costos están intrínsecos en la producción tanto de *Agave tequilana* Weber (var. azul) como de tequila, por lo cual el costo de transporte de las piñas se tomó como valor base el reportado por Contreras (2016), de \$0.313/kg piña.

Tabla 23. Costos de producción de la biomasa de pencas generada en el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) y costo del bagazo generado en la producción de tequila.

Sitio	Costo total producción piñas (\$/t) ^a	Costo total producción pencas (\$/t) ^b	Costo total producción tequila (\$/L)	Costo total producción bagazo (\$/t) ^{b,c}
Amatitán	3,233	1,411	16.5	773
Atotonilco el Alto	4,259	1,852	16.5	978
Arandas	2,980	1,300	16.5	722

^a Base húmeda; ^b base seca; ^c representa la suma del costo desde la producción de piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) más su transporte y transformación en la tequilera donde se genera el bagazo.

Asignarle un valor económico a la biomasa residual producida, podría resultar en una estrategia que apoye el manejo de los periodos de escasez de agave, minimizando en cierta medida las pérdidas que esto genera en el sector agrícola. Conviene preguntarse también, si esta estrategia es un incentivo para mejorar las condiciones laborales de quienes trabajan en el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en el mediano plazo y que como menciona Padilla-Miranda, 2017 represente “un área de oportunidades y garantía de empleos que satisfagan más allá de las necesidades básicas del jornalero y su familia”. Lo anterior considerando que, como se ha mencionado en secciones anteriores, en el sector tequilero existen problemas complejos relacionados con la alta demanda de producto en un mercado que crece año con año, ¿en qué relaciones (económicas, ambientales, sociales, políticas) podríamos incidir si se realiza la comercialización de biomasa para la producción de biocombustibles 2G?

9.2. ETAPA DE TRANSPORTE DE BIOMASA

En este estudio, para el transporte de biomasa en el escenario 1 se tomó en cuenta únicamente el traslado de bagazo a la biorrefinería, en este, ya se considera el transporte de piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) del campo a las tequileras además que se plantea dicha biorrefinería localizada en el mismo sitio de la tequilera; mientras que en el escenario 2 al igual que el transporte de las piñas, se planteó el traslado de biomasa de pencas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) con un porcentaje de humedad del 30% a la biorrefinería para producir bioetanol.

9.2.1. HUELLA DE CARBONO EN LA ETAPA DE TRANSPORTE DE BIOMASA

En el escenario 1, el bagazo será generado en las tequileras, y se propone localizar la biorrefinería de producción de bioetanol a lado de la tequilera, por lo cual se plantea que estará disponible inmediatamente para su uso, y en este punto las emisiones del transporte de bagazo se considerarán despreciables.

Ahora, para el escenario 2 donde se moverán las pencas generadas en la jima a la biorrefinería para producir etanol, se producen emisiones ocasionadas por esta actividad, en la Tabla 24 se muestra la huella de carbono inherente a los tres sitios evaluados. En esta etapa las emisiones del transporte de pencas resultaron menores para Amatitán por su cercanía con la ubicación teórica de la biorrefinería (Tequila, Jalisco). Sin embargo, la distancia promedio se encuentra arriba del rango de las reportadas por Luo et al., (2009) y Cherubini y Ulgiati, (2010) de 56 km a 120 km para rastrojos de maíz y para las reportadas de paja de trigo de hasta 69 km (Arellano-Hernández, 2019).

Tabla 24. Huella de carbono del transporte de pencas y bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) a la biorrefinería ubicada en el municipio de Tequila, Jalisco.

Trayecto	Distancia (km)	Tipo de biomasa	Emisiones GEI (kg CO ₂ eq/t biomasa)
Amatitán – Tequila	12	Pencas ^a	1.0
Atotonilco el Alto – Tequila	160		7.5
Arandas – Tequila	192		118.5
Tequilera – Biorrefinería	0	Bagazo ^b	0
Amatitán – Tequila	12		0.15 ^c
Atotonilco el Alto – Tequila	160		2.1
Arandas – Tequila	192		7.4

^a Con un 30% de humedad; ^b Base seca; ^c Con asignación de impactos al bagazo.

9.2.2. INDICADORES SOCIALES EN LA ETAPA DE TRANSPORTE DE BIOMASA

El transporte de biomasa residual puede contribuir con la creación de empleos directos por actividades nuevas originadas a partir de su uso en la producción de bioetanol y vinculados a un esquema de biorrefinería que aprovecha los residuos de la agroindustria del *Agave tequilana* Weber (var. azul).

Los empleos para esta etapa se relacionaron con el transporte de carga que se utilizaría el cual es de una capacidad de 20 t, debido a que son necesarias 200 t diarias de biomasa, podrían realizarse los viajes diarios con hasta tres operadores en total bajo las condiciones planteadas en el escenario 1, mientras que para el escenario 2 por el número mayor de viajes de biomasa de bagazo y pencas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) serían necesarios hasta 6 operadores. En cuanto a los salarios, se tomó de base el reportado por la Comisión Nacional de Salarios Mínimos (CONASAMI, 2022) para un chofer de camión de carga (\$203.52 MXN) por viaje⁴⁹.

De igual manera, para el manejo de la biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul), se tomó en cuenta el trabajo manual de personas encargadas de realizar esta labor para transportarla de la tequilera a la biorrefinería. Los resultados se muestran en la Tabla 25.

⁴⁹ Consultado en abril de 2023 en:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/686336/Tabla_de_Salarios_Minimos_vigentes_a_partir_del_1_de_enero_de_2022.pdf

Tabla 25. Número de empleos y salarios (MXN) en la etapa de transporte de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul).

Sitio	Escenario 1		Escenario 2	
	Número de empleos (número/ t biomasa)	Salario (\$/ t)	Número de empleos (número/t biomasa)	Salario (\$/ t)
Tequila ^a	0.015	10.176 ^b	NA	94
Amatitán	NA		0.10	22
Atotonilco el Alto	NA	NA	0.08	17
Arandas	NA	NA	0.27	61

^a El transporte del bagazo será de tequileras a la biorrefinería ubicadas en el mismo municipio.

^b Este valor equivale a transportar 20 t por viaje, se obtuvo de dividir el salario de un operador entre las t de biomasa a transportar.

9.2.3. INDICADORES ECONÓMICOS EN LA ETAPA DE TRANSPORTE DE BIOMASA

Los costos relacionados con el valor económico del transporte de la biomasa residual de pencas se obtuvieron de literatura, tomando como base el reportado por Contreras (2016), para piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) de \$0.313/kg. Lo cual significaría un costo de transporte de \$62,600 MXN por cada viaje de 200 t de biomasa para suplir la biorrefinería.

9.3. ETAPA DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA

Se calcularon los indicadores en la etapa de transformación de la biomasa en etanol 2G tomando como referencia el esquema de biorrefinería reportado en literatura por Sánchez et al. (2016) para un proceso de alimentación simple de producción de etanol, los valores de huella de carbono y huella hídrica presentados en dicho trabajo son de 426 g CO₂ eq/MJ y 1.6 L H₂O/MJ, respectivamente.

El número de empleos y los salarios se obtuvieron del trabajo realizado por Magaña Mendoza (2018), en dicho estudio se tomó como base la generación de 0.06 empleos por t biomasa procesada con un salario diario de \$623.96 MXN/empleo generado para, en este caso, una biorrefinería de 200 t de biomasa. En cuanto al costo de producir 1 MJ de bioetanol, tomando como base lo reportado por Sánchez et al. (2016), ajustado a precios del 2022 el costo resulta en \$4.07 MXN/MJ producido.

Mencionando los parámetros de rendimiento, se consideró que toda la celulosa presente en la biomasa residual se transformará en bioetanol, en este sentido, el rendimiento se tomó como los kg de celulosa por tonelada de biomasa tanto de pencas como de bagazo de *Agave tequilana* Weber (var. azul). Tomando el rendimiento de etanol por tonelada de celulosa reportado por Sánchez *et al.* (2016), se determinó el rendimiento de etanol para cada biomasa correspondiente a los sitios de estudio seleccionados, los resultados se encuentran en la Figura 23 y en la Tabla 26.

Es importante decir que, si se tomara únicamente el rendimiento de etanol como parámetro de si utilizar o no la biomasa de agave para la producción de etanol, no sería económicamente viable transportar las pencas a la biorrefinería ya que los mayores rendimientos de etanol se obtendrían en plantas alimentadas 100 % con bagazo (E1), que cuando se alimentan con 78 % de bagazo y 22% de biomasa de pencas de agave (E2), debido a que las pencas tienen menor contenido de celulosa (de 19 % a 20 % vs. 29 % a 34 % en el bagazo). En la gráfica se muestra que los

rendimientos de etanol para el E2 disminuyen entre 8 y 12 kg/t biomasa con respecto al Escenario 1.

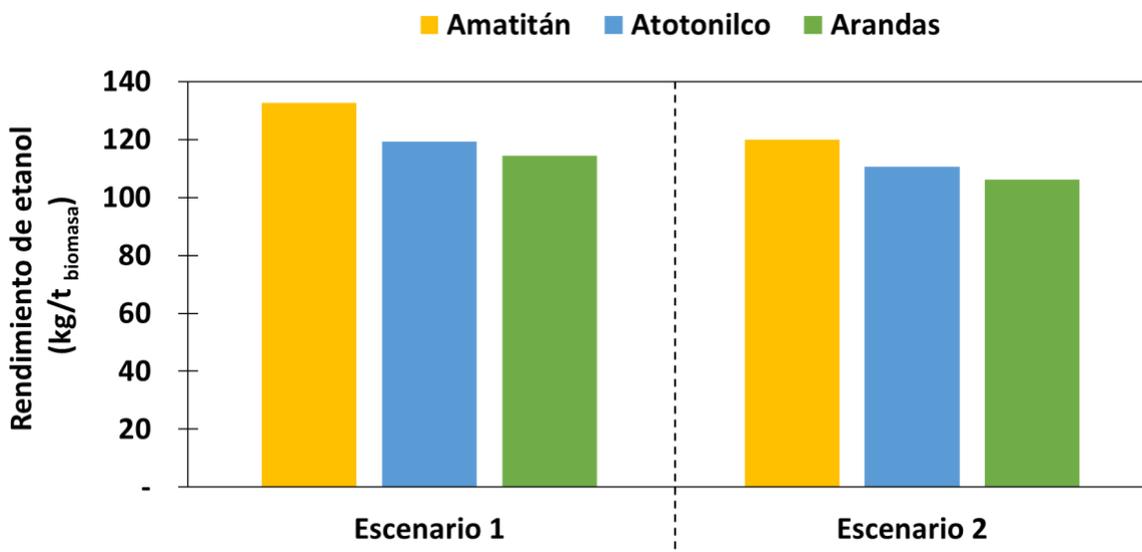


Figura 23. Rendimientos de bioetanol 2G en una biorrefinería alimentada con biomasa de *Agave tequilana* Weber (var. azul). El Escenario 1 considera una alimentación de bagazo, el Escenario 2 considera una biorrefinería alimentada con biomasa de pencas y bagazo.

Tabla 26. Rendimientos de bioetanol 2G en una biorrefinería alimentada con biomasa de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para los escenarios evaluados.

Sitio	Rendimiento (L bioetanol/ t biomasa)	
	Escenario 1	Escenario 2
Amatitán	168	152
Atotonilco el Alto	151	140
Arandas	145	134

Ahora, en comparación con el estudio de Sánchez et al. (2016), en ambos escenarios los rendimientos de etanol se encuentran por debajo de los obtenidos a partir de paja de trigo (176 kg EtOH/t biomasa), sin embargo, es semejante con rendimientos reportados para etanol 1G usando caña de azúcar (116.9 kg EtOH/ t caña) en Manochio *et al.*, (2017). En un estudio donde

usan bagazo de caña de azúcar (García *et al.*, 2011), los rendimientos de etanol son inferiores a los reportados aquí 65.6 kg EtOH/t *versus* 116.7 kg EtOH/t promedio para ambos escenarios. Asimismo, Ríos-González *et al.*, (2017) en una publicación enfocada en determinar rendimientos de etanol usando bagazo de *A. tequilana* muestran rendimientos de 120 kg EtOH/t bagazo, los cuales son similares a los estimados en este trabajo para ambos escenarios. Lo cual significa que es una materia prima con potencial de producción de etanol dentro de los rangos que establecidos actualmente para otros procesos y materias primas.

9.4. INDICADORES GLOBALES DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL 2G CON BIOMASA RESIDUAL DE *Agave tequilana* Weber (var. azul)

Para realizar la evaluación de la sostenibilidad del uso de la biomasa de *A. tequilana* Weber (var. azul), fue necesario medir los aspectos ambientales, sociales y económicos de la producción de bioetanol 2G utilizando esta materia prima en cada etapa, desde la generación de la biomasa hasta su transformación en bioetanol para después presentar los indicadores de forma integrada haciendo una comparación con la producción de gasolina.

En la Figura 23 se presenta la huella de carbono de la producción de bioetanol con biomasa residual de agave para los dos escenarios evaluados. En esta se distingue que la etapa donde se generan las mayores emisiones de GEI es en la etapa de transformación de la biomasa en bioetanol, y de forma general, el escenario 2 tiene las menores emisiones.

Como se observa, es en la etapa de transformación donde se tienen las mayores emisiones de GEI, esto debido a que, en el proceso tomado como referencia, la etapa de cogeneración contribuye con el 80% de las emisiones GEI seguido de la etapa de fermentación (Sánchez *et al.*, 2016). En el proceso de cogeneración, al incrementar la cantidad de combustible a quemar⁵⁰, la cantidad de vapor aumentará, haciéndolo también los gases GEI producidos en la biorrefinería (Magaña, 2018). Lo anterior hace necesario instalar una operación unitaria de captura de

⁵⁰ El combustible utilizado para la cogeneración de electricidad, son los residuos sólidos que no se convierten en azúcares y ligninas provenientes de la etapa de separación (para el diagrama del proceso, ver la Figura 8), lo que significa que el CO₂ emitido es biogénico.

carbono, además de enfocarse en mejorar la eficiencia de conversión de biomasa en bioetanol para cerrar el ciclo de carbono durante la transformación de residuos agroindustriales en biocombustibles 2G.

Al considerar que el carbono biogénico representa el 80% de las emisiones en dicha etapa de cogeneración, los valores de la HC global de la producción de bioetanol utilizando biomasa residual de agave van de 116 g CO₂ eq/MJ a 147 g CO₂ eq/MJ en ambos escenarios. En este sentido, la huella de carbono de la producción de bioetanol comparado *versus* las emisiones por MJ de gasolina, tomado como 94 g CO₂ eq/MJ de gasolina (Wang *et al.*, 2012) es mayor tal como se muestra en la Figura 24.

Sin embargo, se debe considerar que el origen fósil de la gasolina representa un costo ambiental alto que se extiende hasta su uso en vehículos automotores, ya que en dicha etapa se emiten hasta 4.49 ton métricas/ CO₂ eq/vehículo anualmente, emisiones que se elevan a millones de toneladas de CO₂ eq si se toma en cuenta la flota vehicular de cada país (EPA, 2023; Zabed *et al.*, 2017). En 2023, la Secretaría de Energía (SENER), reportó que el consumo final de energía en el sector autotransporte fue de 1678.3 PJ de gasolina.

En Wang *et al.*, (2012) señalan que las emisiones de petróleo y gasolina están sujetas a incertidumbres entre las que se encuentran la asignación de emisiones en el proceso de producción de gasolina, el método de recuperación sobre el métodos de separación del crudo, la profundidad del pozo de donde se extrae el crudo, entre otras causantes de un impacto mayor en comparación con el uso de biocombustibles 2G.

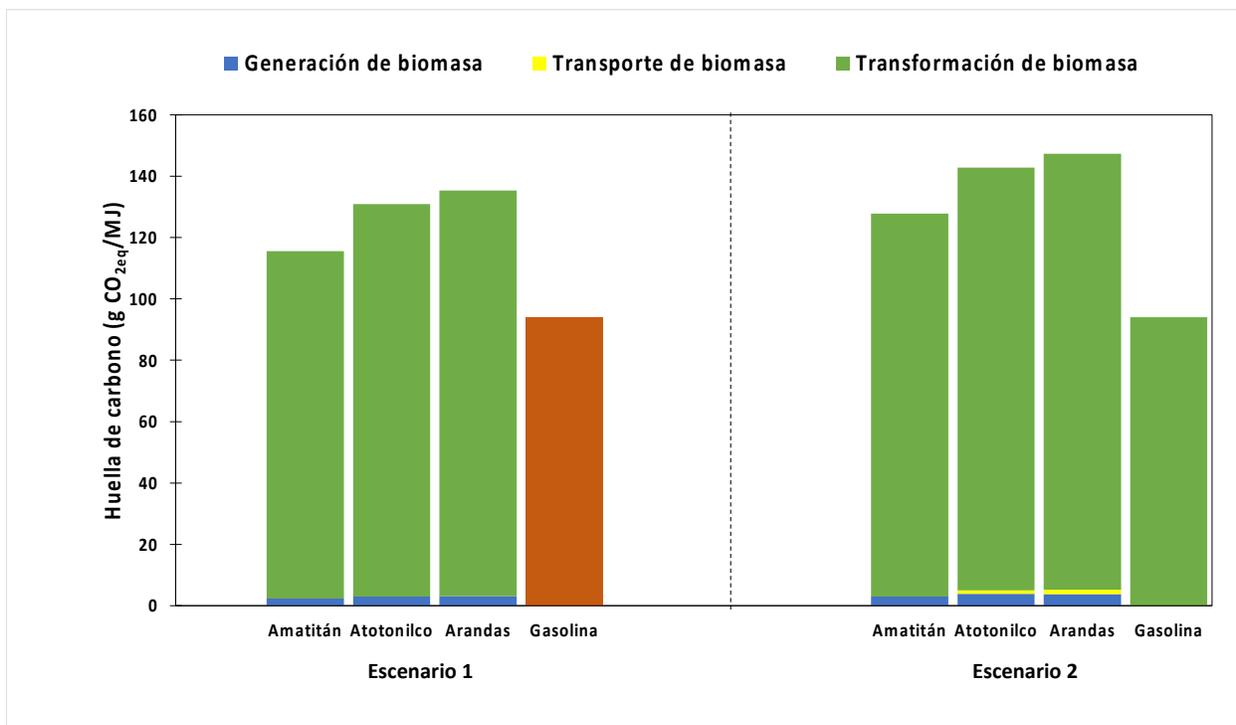


Figura 24. Huella de carbono total de la producción de bioetanol 2G utilizando biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) versus la huella de carbono de la gasolina (Wang *et al.*, 2012).

Ahora, en lo que respecta a la producción de bioetanol 2G, es importante mencionar que para generar elementos que comprueben la consideración de que en su proceso de producción las emisiones de carbono son biogénicas, los estudios acerca de la neutralidad del carbono requieren un análisis completo de todo el ciclo de vida del proceso de transformación de la biomasa que además considere la temporalidad y espacialidad de la generación, transporte y los procesos de transformación de la biomasa (WBSCD Forest Solution Group, 2015). El presente trabajo toma solo una parte de todo el proceso al cual sería interesante agregar la etapa de distribución y uso del biocombustible en cuestión para agregar la neutralidad del carbono a un estudio más detallado.

Por sitio, se observa que la etapa con mayor contribución a la huella de carbono total es la transformación de la biomasa y este valor es prácticamente igual en ambos escenarios. Sin embargo, para el escenario 1 seguido de la transformación, la etapa de generación de biomasa

es la que aporta mayores emisiones en el orden Arandas > Atotonilco el Alto > Amatitán; en cuanto a la etapa de transporte de biomasa, los valores son despreciables por la suposición de que el bagazo se utilizará en la biorrefinería ubicada a lado de la tequilera.

Para el escenario 2, el transporte de biomasa contribuye a la huella de carbono (de 0.4 g CO₂/MJ etanol a 41.8 g CO₂/MJ etanol) ya que como se mencionó anteriormente, las pencas se llevarán del sitio donde se generan en campo hasta la biorrefinería en Tequila, Jalisco, y es aquí donde influye directamente la distancia recorrida siendo la mayor de Arandas a Tequila (192 km) y la más cercana de Amatitán a Tequila (12 km). La etapa de generación de biomasa presenta valores de 3.3 g CO₂/MJ etanol a 12.1 g CO₂/MJ etanol siguiendo el orden Arandas > Atotonilco el Alto > Amatitán respectivamente.

La huella hídrica del proceso global para ambos escenarios mostrada en la Figura 25, presenta una tendencia de mayor consumo de agua en la etapa de transformación para ambos escenarios (90% del consumo corresponde a esta etapa), lo que coincide con otros estudios. De lado izquierdo se encuentran la HH del escenario 1 para el uso de biomasa de bagazo mientras que de lado derecho se muestra el escenario 2 donde se contabiliza la HH de la biomasa de pencas y bagazo de agave en campo y en la tequilera, en general la etapa de transformación aporta un 90% a la huella hídrica total y la generación de biomasa un 10%.

En la etapa de generación de biomasa correspondiente al escenario 1 se contribuye con menos del 2% y con menos del 15% para el escenario 2. La etapa que tiene un mayor consumo de agua es la transformación de la biomasa con un valor de 2.6 L de H₂O/MJ etanol, esto debido a que, en el esquema de biorrefinería elegido, por ser de alimentación simple, del volumen de agua residual de proceso tratada se recircula solo el 20%, haciendo necesario el uso de agua fresca para cubrir los requerimientos de la biorrefinería para transformar la biomasa en etanol (Sánchez *et al.*, 2016).

Por lo tanto, sería conveniente mejorar la operación de tratamiento de aguas residuales (Figura 11), para incrementar el porcentaje de reúso de aguas tratadas en la alimentación de la biorrefinería.

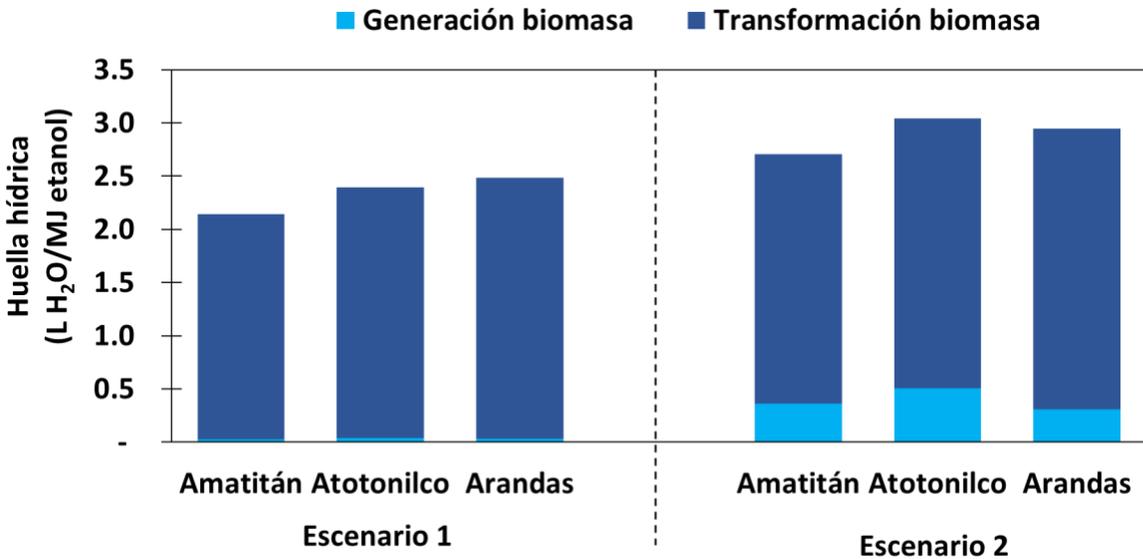


Figura 1. Huella hídrica total de la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) correspondiente a los escenarios evaluados.

Ahora, para los resultados de los indicadores sociales con respecto al número de empleos totales para una biorrefinería de 200 t de biomasa de agave/día, planteada en este trabajo, estos varían dependiendo del escenario (Figura 26). Se crean empleos hasta para 52 trabajadores en la generación de biomasa para el escenario 1, mientras que en el escenario 2 se generan empleos hasta para 62 personas, lo cual en términos de la unidad funcional (1 MJ de bioetanol) van de 6×10^{-5} empleos/MJ a 8.2×10^{-5} empleos/MJ para E1 y de 7.4×10^{-5} empleos/MJ a 10×10^{-5} empleos/MJ.

En la etapa de transporte de biomasa, los empleos generados serían de 3 para el transporte de bagazo y 6 para el transporte de pencas y bagazo, lo que se traduce en 0.43×10^{-5} empleos/MJ a 1.1×10^{-5} empleos/MJ para E1 y E2, respectivamente. Esta diferencia entre escenarios se debe principalmente a que para E2, además de los empleos asociados a la producción de tequila, se estarían creando empleos relacionados directamente con la biomasa tales como su recolección en campo en el caso de las pencas, carga y operación de camiones desde los terrenos donde se jiman las pencas y recolección del bagazo proveniente de tequileras hasta la biorrefinería donde

se transformarían a bioetanol, mientras que en el escenario 1 solo se realizaría la recolección y transporte de bagazo.

Los empleos se generan para 12 trabajadores en la planta en la etapa de transformación de biomasa, en términos de la unidad funcional, dichos empleos corresponden a 1.9×10^{-5} empleos/MJ en promedio para ambos escenarios, ya que el tipo de proceso evaluado es el mismo.

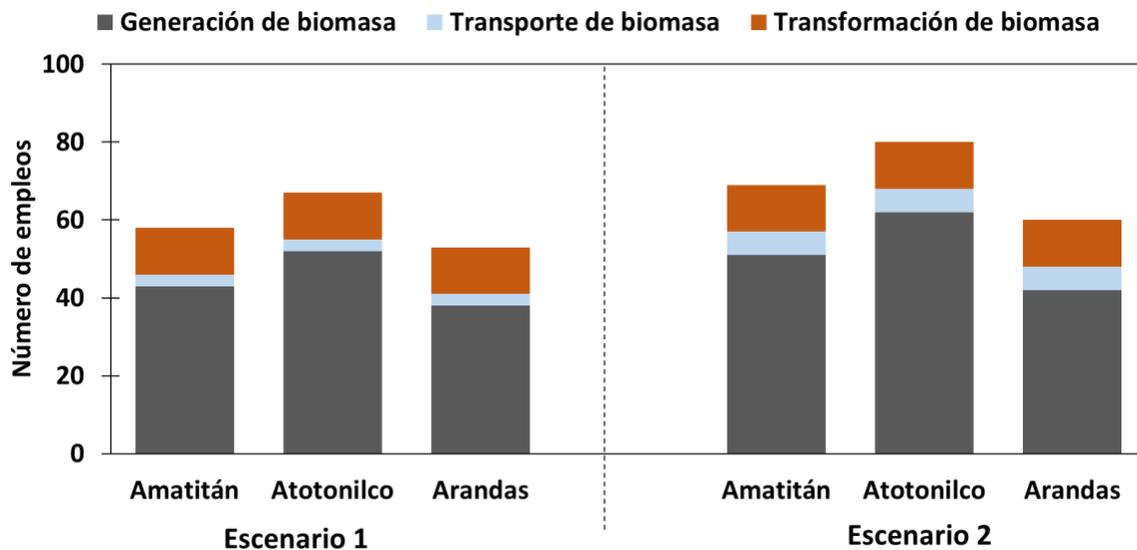


Figura 26. Número de empleos totales generados en una biorrefinería de 200 t de biomasa de *Agave tequilana* Weber (var. azul) para la producción de bioetanol 2G.

Comparado con estudios que han tomado en cuenta el número de empleos y el salario tal como en Cardoso et al. (2018) los resultados están por encima de lo reportado en dicho trabajo, puesto que el mayor número de empleos calculado para producción de etanol a partir de caña de azúcar es 1.4×10^{-5} por cada millón de litros de etanol producidos. Para un estudio similar publicado por Nova Institute en 2017 se muestra que utilizando paja de trigo pueden producirse hasta 0.758×10^{-5} empleos en esta fase; otro estudio comparativo es el realizado en una prueba piloto de la Global Bioenergy Partnership (2014) en Colombia para la producción de bioetanol, donde

menciona que el número corresponde a 0.11×10^{-5} empleos/MJ. Sin embargo, no se aclara cuántos son creados en la fase de generación de la biomasa.

Los empleos con potencial de generarse en el ámbito de la producción de bioetanol 2G, representarían una mejora en la producción de *Agave tequilana* Weber (var. azul), puesto que los trabajos temporales existentes en el área agrícola podrían transformarse en permanentes e incluso generar nuevos enfocados únicamente en la recolección de la biomasa en campo.

En cuanto a los salarios, un beneficio regional para los agricultores del agave es que estos podrían aumentar como consecuencia del valor agregado a la biomasa residual, provocando una diversificación económica atribuida a la producción de bioetanol (IEA, 2010; Walter *et al.*, 2011).

En los resultados obtenidos en este trabajo, se observa que los mejores salarios son para las etapas de transporte y transformación de biomasa, la razón es que mientras se avanza en las etapas de producción de bioetanol, el nivel de especialización requerido para llevar a cabo tales procesos aumenta (Tabla 27). Para el E2, los salarios aumentan debido a que la labor de recolección y carga de biomasa en campo para su transporte a la biorrefinería requiere un pago extra al actual existente en la cadena de producción de tequila.

En cuanto a la etapa de transporte, de implementarse el uso de biomasa residual en los sitios estudiados, se daría la creación de empleos por cuestiones logísticas de planeación de rutas, mantenimiento a vehículos de carga y personal encargado de verificar las cargas dirigidas a la biorrefinería, entre otros, lo que resultaría un beneficio en el fortalecimiento de la cadena productiva Agave-Tequila en el mediano plazo.

Tabla 27. Salarios totales por etapa de la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa de *Agave tequilana* Weber (var. azul).

Sitio	Salario (\$/MJ) x 10 ⁻³							
	E1				E2			
	Generación	Transporte ^b	Transformación	Total	Generación	Transporte	Transformación	Total
Tequila ^a	0	26.5	NA	26.5	0	33.2	NA	33.2
Amatitán	0.8	0	120	120.8	6.3	6.2	120	132.5
Atotonilco el Alto	1.3	0	134	135.3	12.1	5.3	134	151.4
Arandas	0.9	0	140	140.9	7.4	20.0	140	167.4

^a En la etapa de transporte para el escenario 1, se considera que la planta donde se produciría el etanol se ubicará en Tequila, Jalisco. Esto involucra que la biomasa generada estaría disponible en sitio.

^b En la etapa de transporte para el escenario 1, se considera que no existen salarios dado que no hay una etapa de traslado del bagazo a la planta donde se produciría el etanol.

Los costos asociados a la producción de bioetanol únicamente tomando en cuenta los costos de generación de la biomasa, su transporte y transformación, se presentan en la Tabla 28, recordemos que para el escenario 1 el costo de transporte es igual a cero por la suposición de que por el sitio donde se genera el bagazo de las tequileras y la ubicación teórica de la biorrefinería, no se le asignó costo alguno al transporte de bagazo. Los costos totales de producción de bioetanol 2G van de \$3.19 MXN/MJ hasta \$3.28 MXN/MJ en el Escenario 1 y de \$3.67 MXN/MJ hasta \$3.95 MXN/MJ para el Escenario 2, dependiendo del sitio. Comparado con estudios de índole económica tales como Losordo et al., (2016), y Cardoso et al., (2018) con valores de 0.48 MXN/MJ a 1.45 MXN/MJ el costo de producir bioetanol 2G en México bajo un esquema de biorrefinería a partir de biomasa residual de *A. tequilana* Weber (var. azul) es mayor (Tabla 28) comparado con el costo de hacerlo en países como Brasil. Lo anterior debido probablemente

porque en ese país la tecnología está probada a gran escala mientras en México, se encuentra en desarrollo.

Tabla 28. Costos asociados a las etapas de producción de bioetanol 2G a partir de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en MXN. Elaboración propia.

Sitio	Costos E1 (\$/MJ)				Costos E2 (\$/MJ)			
	Generación	Transporte	Transformación	Total	Generación	Transporte	Transformación	Total
Amatitán	0.22	0	2.97	3.19	0.68	0.020	2.97	3.67
Atotonilco el Alto	0.31	0	2.97	3.28	0.96	0.021	2.97	3.95
Arandas	0.24	0	2.97	3.21	0.71	0.022	2.97	3.70

Tabla 29. Costos de bioetanol 2G producido de biomasa residual de *Agave tequilana* Weber (var. azul) versus costo de gasolina en México. Elaboración propia.

Sitio	Costo (\$/L)			
	Bioetanol E1	Bioetanol E2	Gasolina regular ^a	Gasolina Premium ^b
Amatitán	67.4	77.6	21.53	23.66
Atotonilco el Alto	69.3	83.5		
Arandas	67.9	78.2		

a, b: El precio promedio nacional para la gasolina (referente al 2022) se obtuvo de los datos disponibles en: <https://www.gob.mx/cre/articulos/precios-vigentes-de-gasolinasy-diesel> Consultados el día 9 de mayo 2023.

En comparación con el costo de venta de gasolina en México, la producción de bioetanol 2G para ambos escenarios no sería viable por el costo actual que representan el uso y la transformación de la biomasa de *A. tequilana* Weber (var. azul). Sin embargo, debe considerarse que, dado los escenarios de aumento en los costos de extracción y refinamiento de combustibles fósiles, así como la disminución en la producción de energía primaria en México (sección **Error! Reference source not found.**) y los subsidios que se le brindan actualmente a los combustibles fósiles, el mercado del etanol podría tener una oportunidad en algunos años si existe realmente interés en desarrollar y construir biorrefinerías y cadenas logísticas del transporte de biomasa a mediana escala, esto podría influir en la disminución de costos de dicho biocombustible con diferentes fuentes de biomasa que además, como es el caso de la biomasa de agave aquí analizada, la única etapa donde existirá un consumo de agua significativo es en la transformación de la misma, así como emisiones asociadas a este proceso de producción de bioetanol.

En un estudio realizado por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés) en el año 2013, se determinó que el costo de producir etanol 2G será de 1.04 USD/lge a 1.45 USD/lge⁵¹. Este valor se tomó como base para comparar con el resultado del presente estudio, para lo cual se tomó el valor del USD en 2013 para transformarlo a costos del 2022 como se muestra en la ecuación 37 resultando en 24.65 MXN/L bioetanol o 1.16 MXN/MJ EtOH.

Estos datos fueron útiles para determinar el valor normalizado del indicador relacionado con costos de producción del bioetanol aquí analizado.

⁵¹ El valor de litros de gasolina equivalente (lge se tomó de <https://www.ren21.net/gsr-2018/pages/units/units/> donde señalan que 1.7 L etanol equivale a 1 L gasolina. El valor se obtuvo de <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Transportation-costs/Bioethanol> consultado el 03 de junio 2023.

9.5. ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DEL USO DE LA BIOMASA DE *Agave tequilana* Weber (var. azul) PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL 2G

La producción de biocombustibles 2G en nuestro país es cada vez más tangible, puesto que estudios como éste señalan los puntos donde se puede incidir para lograr la sostenibilidad de usar materias primas como los residuos agroindustriales de bagazo y pencas generados en el proceso de producción del tequila, así como puntos referentes a las limitaciones técnicas e incluso económicas que pueden resolverse para lograr la producción de bioetanol 2G tomando en cuenta dos escenarios diferentes.

Tomando en cuenta los tres ejes abordados en el presente trabajo, en la metodología se plantea normalizar los indicadores utilizando una representación gráfica en forma de ameba para realizar una evaluación homogénea entre los aspectos ambientales y socioeconómicos los resultados indicarán qué tan sostenible es cada escenario evaluado (Figura 27). En el Anexo A se muestran las ecuaciones utilizadas en la normalización de los indicadores evaluados en este trabajo, así como los valores resultado en la evaluación de la sostenibilidad del Escenario 1.

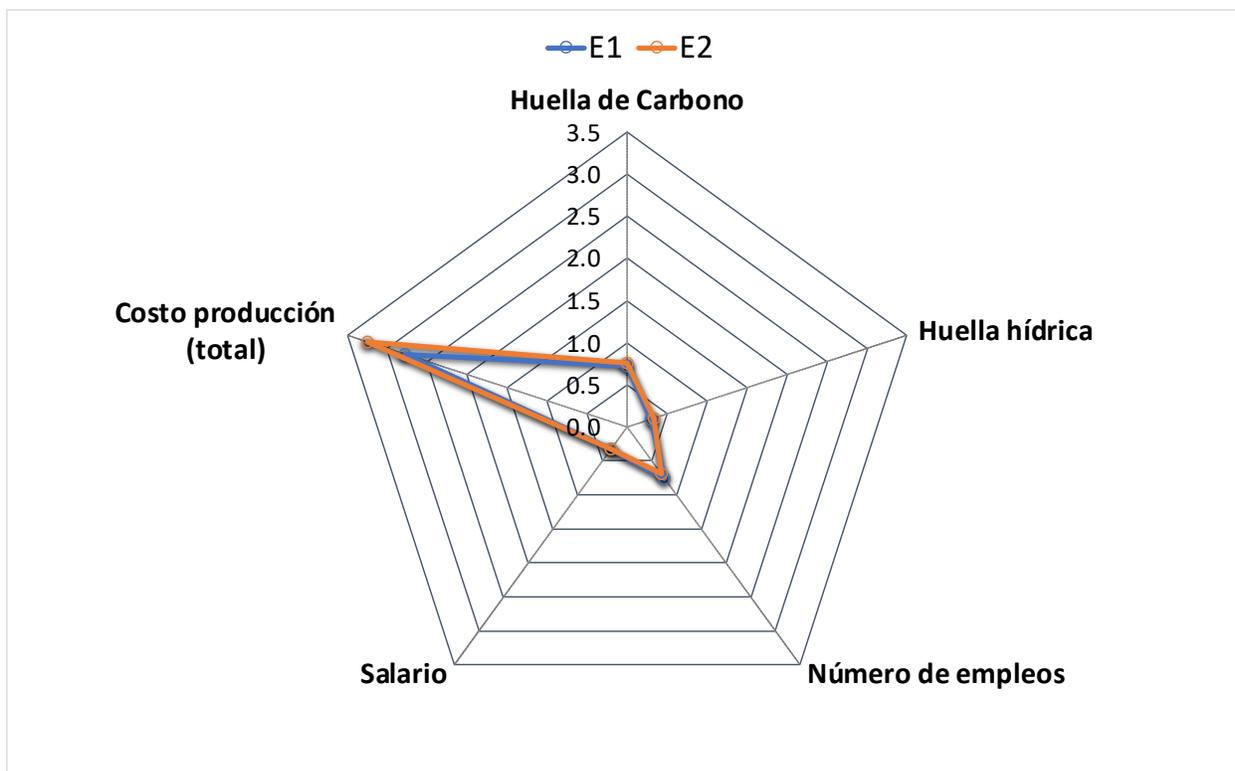


Figura 27. Comparación entre los valores totales por indicadores ambientales, sociales y económicos en términos de la unidad funcional (1 MJ etanol) para los dos escenarios evaluados.

En función de los indicadores ambientales cuantificados en este trabajo, para la huella de carbono, no hay cambios significativos entre E1 y E2 por usar solo el bagazo, o usar bagazo y pencas ya que la única etapa donde se producen emisiones es en el transporte de pencas para el E2 y dado que la materia prima es en esencia la misma, los procesos de transformación a etanol así como las emisiones asociadas a estos, no cambian.

En términos de la huella hídrica, los valores para ambos escenarios también son muy similares, E2 presenta una HH de 0.6 L H₂O/ MJ bioetanol mayor en comparación con el E1. Esto es un buen número comparado con estudios como el de Arellano-Hernández (2018) donde se midió el consumo de agua en la producción de biocombustibles líquidos donde, para el caso de biobutanol 2G a partir de rastrojo de maíz o paja de trigo, los valores de consumo de agua van de 10 L H₂O/ MJ biobutanol para rastrojo de maíz hasta 30 L H₂O/ MJ biobutanol para paja de trigo respectivamente.

En los indicadores sociales, resultaría mejor optar por el E2, ya que el uso de los residuos agrícolas provenientes del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul), desencadenaría la creación de 12 empleos permanentes (si se toman las 200 t de biomasa a transformar) con un salario fijo de 0.15 \$/MJ en promedio, los cuales aumentarán conforme la construcción de una biorrefinería sea una realidad (Figura 26). En comparación, el E1 tendría empleos y salarios distribuidos únicamente en la etapa de transformación de la biomasa puesto que no habría personal extra involucrado en la generación y transporte de biomasa más que el ya existente en la misma producción del tequila o algunos que pudieran generarse para la transformación de la biomasa en las mismas instalaciones.

En términos de indicadores económicos relacionados con el rendimiento de producción de bioetanol, resulta más adecuado optar por el E1 usando solo bagazo ya que se puede producir una mayor cantidad de litros de biocombustible, lo que es mejor el E2 para la producción de bioetanol 2G. Además, al involucrar aspectos económicos relacionados con el uso de las pencas se tiene un costo adicional por transportarlas desde el sitio donde se genera, en este sentido, el rendimiento de bioetanol combinando bagazo y pencas es menor que cuando se utiliza únicamente bagazo por la composición/contenido de celulosa de los residuos como se determinó en pruebas de laboratorio.

En resumen, los indicadores ambientales indican que los dos escenarios son semejantes en cuanto a los impactos que generan, mientras que los indicadores sociales señalan que es ligeramente mejor el E2 por la posibilidad de una mayor generación de empleo e ingreso, pero el aspecto económico indica que el E1 es más factible ya que el considerar la transformación de biomasa, implica una mayor inversión económica y de inicio el costo del producto final (bioetanol) como se observa en la figura 27, siendo el punto que más resalta en la comparación de sostenibilidad de ambos escenarios. Por esta razón y porque debido a que los valores normalizados son más cercanos al cero, en la evaluación global es más sostenible el escenario 1 utilizando bagazo generado en la producción de tequila para su transformación a bioetanol 2G.

10. CONCLUSIONES

De acuerdo con los criterios de selección, se eligieron tres sitios en el Estado de Jalisco (Amatitán, Atotonilco el Alto y Arandas) por tener el mayor potencial teórico de generación de biomasa. A partir de tales resultados se determinó que es factible una capacidad de planta de 200 t biomasa de agave/día operando 330 días/año.

En este estudio se encontró que el uso de la biomasa de pencas para la producción de etanol disminuye hasta en 50% las emisiones de GEI debidas a la quema y descomposición en campo (de 241 kg CO₂ eq/t en el E1 a 106 kg CO₂ eq/t biomasa en el E2), con una mayor contribución de la etapa de jima seguida por la etapa de preparación del terreno y el mantenimiento del cultivo. Respecto a la huella hídrica de la biomasa de *A. tequilana* Weber (var. azul) se demuestra que es hasta 10 veces menor que la huella hídrica de otras materias primas como paja de trigo o rastrojos de maíz, lo que puede representar una ventaja de bajo consumo de agua en zonas con problemas de presión hídrica o escasez de agua cuando se consideren fuentes de biomasa residual para producir biocombustibles.

Otro de los hallazgos de este trabajo es que la recolección y transporte de biomasa de pencas tiene un impacto positivo en el resultado final de los indicadores sociales porque teóricamente generaría empleos extra. Sin embargo, económicamente puede ser inviable para municipios como Arandas que se encuentran muy lejanos del sitio donde se ubicará la biorrefinería por los costos asociados al transporte de la biomasa. Una cuestión importante a considerar respecto al costo de la biomasa de agave para la producción de etanol 2G, es la inestabilidad en el precio del agave como materia prima para la producción de tequila, ya que influirá directamente en el sistema de bioenergía aquí planteado si no se definen métricas para un costo accesible que tenga relación directa con el proceso de producción de bioetanol.

En cuanto a la optimización del proceso de transformación de la biomasa en etanol, es necesario mejorar etapas dentro del esquema planteado para disminuir las emisiones GEI y consumo de agua tales como el pretratamiento para transformar la materia prima en biocombustibles 2G, así como otros recursos además que para un análisis más completo y específico del uso de esta biomasa de agave en el contexto de la agroindustria del tequila, es necesario incluir cuestiones relacionadas con políticas públicas y estudios de mercado que influyen en la industria de producción de tequila, además de evaluar hasta qué punto los estudios relacionados con el aprovechamiento de residuos de bagazo y vinaza son viables en distintas tequileras para obtener información adecuada a la realidad.

En este sentido, es necesario escalar procesos más eficientes de transformación de la materia prima lignocelulósica para mejorar la producción de biocombustibles 2G a mediana y gran escala con una visión de avanzar en los compromisos adquiridos en tratados internacionales y a su vez, lograr la consecución de varios ODS sobre todo aquellos relacionados con la energía, el manejo del agua, consumo y producción responsables y acción climática.

A pesar que en este trabajo se estudiaron algunos indicadores sociales, para evaluar la sostenibilidad de sistemas de producción de bioenergía, es necesario considerar indicadores sociales más a detalle que además involucren cuestiones de género y cómo se percibe la agroindustria del tequila a futuro, tomando en cuenta si el producir etanol utilizando biomasa de *Agave tequilana* Weber (var. azul), le daría estabilidad a la cadena productiva agave-tequila en relación con el ciclo del agave, es decir, si podría existir una estabilidad en cuanto a precio de la materia prima y las ganancias económicas que podría representar son suficientes para reponerse ante la pérdida de producto o sobreoferta de este.

Lo anterior porque en el sector tequilero existen problemas complejos relacionados con la demanda de materia prima (agave, agua, energía) y actualmente no hay estrategias claras y viables para gestionar el alto volumen de los residuos generados, por lo cual, trabajos como este que trata de tener un enfoque multidisciplinario, suman opciones para considerar impactos sociales y ambientales en las soluciones que puedan implementarse ante dicha problemática. Sin

embargo, tener una visión holística de la producción de destilados involucra impulsar una transformación de fondo en dicho sector.

Respecto a la producción de bioetanol 2G, es necesario que existan políticas públicas que fomenten el uso de biocombustibles en el autotransporte o en transporte de carga, ya que de esa manera tendría que crearse un apoyo real de subsidios a este tipo de combustibles, apoyo a la inversión en tecnología, recursos humanos, así como a las agroindustrias que generan los residuos biomásicos que servirán como materia prima para su producción.

Finalmente, es necesario dar la importancia y visibilidad a los y las productores, trabajadores así como todas las personas involucradas en la cadena agave-tequila para llevar una co creación de conocimiento en productos tangibles. Generar vínculos entre productores, campesinos y academia, permitirá también respetar e involucrar cuestiones culturales en proyectos que se relacionen con la mejora del sector.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Alhajj Ali, S., Tedone, L., Verdini, L., & De Mastro, G. (2017). Effect of different crop management systems on rainfed durum wheat greenhouse gas emissions and carbon footprint under Mediterranean conditions. *Journal of Cleaner Production*, 140, 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.135>
- Astier, M., & Masera, O. (2008). Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. [.org/10.22201/ciga.9788461256419e.2008](https://doi.org/10.22201/ciga.9788461256419e.2008).
- Consejo Regulador del Tequila. (26 de Julio de 2017). El tequila. Empresas certificadas. Obtenido de CRT: https://www.crt.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=75&Itemid=319
- Conway, G. (1987). The properties of agroecosystems. *Agricultural Systems*, 24(2), 95-117.
- Agency, I. I. (2017). Policies beyond IEA countries- Mexico 2017. IEA.
- Bowen, S., & Valenzuela-Zapata, A. (2006). Denominations of Origin and socioeconomic and ecological sustainability: the case of Tequila. III Congreso Internacional de la Red SIAL alimentación y territorios. Jaén, España: Universidad Internacional de Andalucía.
- Bowen, S., & Valenzuela-Zapata, A. (2009). Geographical Indicators, terroir and socioeconomic and ecological sustainability: the case of tequila. *Journal of rural studies*, 25, 109-119.
- Bustamante-Moreno, E. I. (1983). Estudio agroecológico de los agaves de la zona de influencia Tequila, Jalisco. Tesis de Licenciatura. México, D.F.: UNAM.
- Fleskens, L., Duarte, F., & Eicher, I. (2009). A conceptual framework for the assessment of multiple functions of agro-ecosystems: A case study of Tra's-os-Montes olive groves. *Journal of Rural Studies*, 25, 141–155.
- Gliessman, S. R. (1990). *Agroecology: Researching the ecological basis for sustainable agriculture*. New York: Springer-Verlag .
- Guzmán-Casado, G., Gonzáz de Molina, M., & Sevilla-Guzmán, E. (1999). *Introducción a la agroecología como desarrollo rural sostenible*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, Londres, Reino Unido.
- Hossain, I., Imteaz, M.A. and Khastagir, A. (2021), Water footprint: applying the water footprint assessment method to Australian agriculture. *J Sci Food Agric*, 101: 4090-4098. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11044>

J. Popp, Z. Lakner, M. Harangi-Rákos, M. Fári. The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 32, 2014. Pages 559-578, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056>.

Hecht, S. B. (1995). The evolution of agroecological thought. *Agroecology: the science of sustainable agriculture*.

Holmatov, B., Hoekstra, A. Y., & Krol, M. S. (2019). Land, water and carbon footprints of circular bioenergy production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111(April), 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.085>

IEA. (2016). Key Renewables Trends. Extracto de: Renewables information (edición 2016). International Energy Agency.

IEA (2020). Changes in transport behaviour during the COVID-19 crisis. <https://www.iea.org/articles/changes-in-transport-behaviour-during-the-covid-19-crisis>.

Consultado el 29 de julio de 2023.

ISO 14040:2006. Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia. ISO: Geneva, Switzerland, 2006. Consultado en octubre de 2023.

ISO 14044:2006 Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida- Requisitos y directrices. ISO: Geneva, Switzerland, 2006. Consultado en octubre de 2023.

ISO 14046:2014(es). Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices. Geneva, Switzerland, 2006. Consultado en octubre de 2023.

ISO 14067: 2018 Gases de efecto invernadero - Huella de carbono de productos- Requisitos y directrices para cuantificación. ISO: Geneva, Switzerland, 2018. Consultado en octubre de 2023.

Jose, S., & Bhaskar, T. (2015). Biomass and Biofuels. Advanced Biorefineries for Sustainable Production and Distribution. U.S.A: CRC Press.

Kroenke, D., & Auer, D. (2009). Database Concepts. New Jersey: Prentice Hall.

Masera, O., Astier, M., & López-Riadura, S. (1999). Sustentabilidad y manejo de recursos: El marco de evaluación MESMIS . México, D.F: Grupo Internacional de Tecnología Rural Apropiaada A.C.

Martínez-Arce, A., Chargoy, J., Puerto, M., Rojas, D., & Suppen, N. 2018. Water Footprint (ISO 14046) in Latin America, State of the Art and Recommendations for Assessment and Communication. *Environments*, 5(11), 114. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/environments5110114>

NOM-006-SCFI-2012. (22 de Julio de 2017). Diario Oficial de la Federación. Obtenido de NOM-006-SCFI-2012, Bebidas alcohólicas-Tequila-Especificaciones.: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5282165&fecha=13/12/2012
Ochoa García, H. (2006). *Agricultura, sociedad y espacios productivos en el sur de Jalisco*. Tesis de Maestría. Puebla: Universidad Iberoamericana Puebla.
OECD/IEA. (2016). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.

Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). 2019. Refinamiento de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4 Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra actores de emisión <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>. Consultado el 14 de octubre de 2023.

Peña, H. (Abril-Septiembre de 1980). *Ecología y capital: una reflexión teórica*. *Antropología y Marxismo*(3).

Pérez, L. H. (2011). *El sistema de producción de Agave tequilana Weber variedad azul y el desarrollo local en Tequila, Jalisco*. Puebla: Colegio de Postgraduados.

Ponce, H., & de la Cerda, C. H. (1981). *La regionalización del ambiente basada en la fisiografía y su utilidad en la producción agrícola*. En I. Hernández, *Agroecosistemas de México*. México: Colegio de Posgraduados. Chapingo.

Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad. (s. f.). *Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad*. <https://energia.conacyt.mx/planeas/>

Pretty, J. (2008). *Agricultural sustainability: concepts, principle and evidence*. *Philosophical transactions of The Royal Society*, 363, 447- 465.

PROCESO. (10 de Noviembre de 2003). *Tequila: Crisis recurrente*. PROCESO.

PROCESO. (3 de Noviembre de 2004). *Alertan contra sobreproducción de agave, en Jalisco*. PROCESO.

REN21. (2017). *Renewables 2017 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.

Ríos-Osorio, L., Salas-Zapata, W., & Espinosa-Alzate, J. (2013). *Resiliencia socioecológica de los agrosistemas, más que una externalidad*. En C. Nicholls, L. Ríos-Osorio, & M. Altieri, *Agroecología y resiliencia socioecológica: adaptándose al cambio climático* (págs. 60-76). Medellín: CYTED.

- Ruiz, J. (12 de Julio de 2017). Empresas privadas encuentran gran yacimiento en el Golfo de México. *El Financiero*.
- Stair, R., & Reynolds, G. (2001). *Principles of Information Systems*. Boston: Course Technology.
- UNEP. (2016). *Global Trends in Renewable Energy Investment 2016*. United Nations Environment Programme.
- Bowen S., Valenzuela Zapata A. 2009. Geographical Indicators, terroir and socioeconomic and ecological sustainability: the case of tequila. *Journal of rural studies* 25: 109-119.
- Bowen S. 2012. Las Indicaciones Geográficas, la globalización y el desarrollo territorial: El caso del tequila. *Agroalimentaria* 18 (34): 91-103.
- Consejo Regulador del Tequila (CRT). <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/> Consultado en mayo de 2017.
- Fossil fuel subsidies. 2023. Fossil Fuel Subsidies. <https://fossilfuelsubsidytracker.org/country/> Consultado el 28 de julio del 2023.
- Gao, T., Liu, Q., & Wang, J. (2014). A comparative study of carbon footprint and assessment standards. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3), 237–243. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt041>.
- García Figueroa E., García Segura G.A. 2010. Desplazamiento del maíz por el agave azul en ocho municipios del estado de Nayarit. Tesis de Licenciatura. UNAM- FES Cuautitlán. 49 pp.
- García-Herrera E.J., Méndez-Gallegos S. J., Talavera-Magaña D. 2010. El género *Agave* spp. en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. *Revista Salud Pública y Nutrición, Edición Especial No. 5*. 109-129.
- García-Marín P.C., Saavedra A. L., Eguiarte L.E., Zizumbo-Villarreal D. 2007. En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves. CICY-CONACYT-CONABIO-INE. México. 395 pp.
- García-Mendoza A. J. 2007. Los Agaves de México. *Ciencias* 87, 14-23.
- García-Moya E., Romero Manzanares A., Nobel P.S. 2011. Highlights for Agave Productivity. *GCB Bioenergy* 3, 4-14.
- Gerritsen P.R., Rosales Adame J.J., Moreno Hernández A., Martínez River L.M. 2011. Agave azul y el desarrollo sustentable en la cuenca baja del río Ayuquila, Costa Sur de Jalisco (1994-2004). *Región y sociedad. El Colegio de Sonora* 23 (51): 161-192.
- Gómez Treviño. 2017. Diversificación del uso de energías renovables y la seguridad energética en México. *El Colegio de México-Centro de Estudios Internacionales. Perspectivas Energéticas* (1): 3, 18-20.
- International Energy Agency (IEA), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. *How 2 guide for Bioenergy Roadmap Development and Implementation*. 75 pp. ISBN: 978-92-5-109586-7.
- International Energy Agency. *Ethanol and gasoline prices 2019 to April 2022*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/ethanol-and-gasoline-prices-2019-to-april-2022>, IEA. Licence: CC BY 4.0
- IRENA. 2017. *REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

- Koizumi T. 2015. Biofuels and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, 829-841.
- Ley de Desarrollo Rural Sustentable, 2001. Diario Oficial de la Federación (DOF), México D.F., 57 pp.
- Ley General de Cambio Climático. 2012. Diario Oficial de la Federación (DOF), México D.F., 44 pp.
- Ley de Transición Energética. 2015. Diario Oficial de la Federación (DOF), México D.F., 31 pp.
- Li H., Pattathil S., Foston M.B., Ding S.Y, Kumar R., Gao X., Mittal A., Yarbrough J.M, Himmel M.E., Ragauskas A.J., Hahn M. G., Wyman C.E. 2014. Agave proves to be a low recalcitrant lignocellulosic feedstock for biofuels production on semi-arid lands. *Biotechnology for biofuels* 7:50.
- Núñez M. H., Rodríguez L. F., Khanna M. 2011. Agave for tequila and biofuels: an economic assessment and potential opportunities. *CBG Bioenergy* 3, 43-57.
- Ortuño Arzate S. 2009. El mundo del petróleo. Origen, usos y escenarios. Fondo de Cultura Económica: La ciencia para todos. 1ra ed. México, ISBN: 9786071601520.
- Padilla Miranda, L. (2017). *Calidad de vida de los jornaleros del agave en el municipio de Tequila, Jalisco*. Universidad de Guadalajara. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.12104/71558>
- PEMEX. 2017. Base de datos institucional. Producción de petróleo crudo por región y activo. Disponible en: <http://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions> consultado el 19 de junio de 2017.
- Pérez, L. H. (2011). El sistema de Produccion de Agave Tequilana Weber Variedad Azul y el Desarrollo Local en Tequila Jalisco. *Colegio De Posgraduados*, 34(1), 741–746. http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/256/Sanchez_Borja_M_DC_Fitosanidad_2010.pdf?sequence=1
- Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático. (n.d.). Consultado el 31 de julio de 2023, en <https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/energia/>
- Renderos, Rafael. (2014). Huella Hídrica del Cultivo de Caña de Azúcar. Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/303939723_Huella_Hidrica_del_Cultivo_de_Cana_de_Azucar.
- Ruiz H. A., Martínez A., Vermerris W. 2016. Bioenergy potential, energy crops, and biofuel production in Mexico. *Bioenergy Resources* 9, 981-984.
- Ritchie, H. (2022, 27 octubre). *Energy*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- Sacramento Rivero, J. C., Mwampamba, T. H., Navarro-Pineda, F. S., Musule, R., García, C. A., Martínez-Bravo, R. D., Morales-García, A. L., Equihua-Sánchez, M., Fuentes-Gutiérrez, A. F., Gallardo-Álvarez, R. M., Ruiz Camou, C. R., Grande-Acosta, G. K., Manzini, F., Islas-Samperio, J. M., & Camarillo, R. (2022). A Methodological Framework for Assessing the Sustainability of Solid

Biofuels Systems. *Bioenergy research*, 15(4), 1797–1819. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10365-2>.

Salcido Ruiz, S., R W Gerritsen, P., & Hernández Moreno, Arturo. (2016). Evaluación de la multifuncionalidad de sistemas de producción agrícola en el sur de Jalisco , México. *Sociedades Rurales, Producción Y Medio Ambiente*, 16(31).

Sánchez A., Magaña G., Partida M.I., Sánchez S. 2016. Bi-dimensional Sustainability Analysis of a Multi-Feed Biorefinery Design for Biofuels Co-production from Lignocellulosic Residues and Agro-industrial Wastes. *Chemical Engineering Research and Design* 107, 195-217.

Sanchez Soto, G. A. (2017). Las mujeres agricultoras de agave azul de Tequila, Jalisco: un acercamiento a los factores sociales, económicos y familiares que influyen en el surgimiento de sus necesidades de información. In *Usuarios de la información y Web 2.0* (Vol. 6, p. 128). Universidad Nacional Autónoma de México. https://doi.org/https://ru.iibi.unam.mx/jspui/handle/IIBI_UNAM/CL90

Secretaría de Energía (SENER). 2023. Sistema de Información energética. Balance Nacional de Energía: Consumo de energía en el sector transporte: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cveuca=IE7C05>. Consultado el 8 de diciembre de 2023.

Scragg A. H. 2009. *Biofuels Production, Application and Development*, 1a ed., cabi, UK.

Scarpore F. V., Dourado Hernandez T.A., Ruiz-Corrêa S. T., Tiago K. O., José de Castro G.G., Silva dos Santos L.N., Luiz Victoria R. 2016. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, Vol 112, Part 5. Pages 4576-4584. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>.

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2016. *Atlas Agroalimentario*. 1ra Ed. México.

Secretaría de Energía. 2015. *Balance Nacional de Energía*.

Secretaría de Energía. 2016. *Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030*.

Speight J.G., Singh K. 2014. *Environmental management of energy from biofuels and biofeedstocks*. 1a ed., Wiley & Sons, USA.

Valenzuela Zapata A.G. 2003. *El Agave tequilero: Cultivo e industria en México*. Ediciones Mundi-Prensa México. 3ra Edición. 215 pp.

Valenzuela Zapata A. G. 2011. A new agenda for blue agave landraces: food, energy and tequila. *GBC Bioenergy* 3, 15-24.

Valenzuela Zapata A.G., Macías Macías A. 2014. *La Indicación geográfica del Tequila: lecciones de la primera denominación de origen mexicana*. Universidad de Guadalajara. 125 pp.

Valenzuela Zapata A.G. *Agave azul la historia por venir. Patrimonio cultural y Turismo* 15. Cuadernos. <http://www.cultura.gob.mx/turismocultural/cuadernos/pdf15/articulo8.pdf> Consultado en Abril, 2017.

Valenzuela Zapata, A. (2023, 3 marzo). Agua y tequila: importante relación a cuidar. <https://www.linkedin.com/pulse/agua-y-tequila-importante-relaci%C3%B3n-cuidar-dr-ana-valenzuela-zapata/?originalSubdomain=es>. Consultado el 20 de octubre de 2023.

US EPA. 2023. Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References | US EPA. (2023, May 30). <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references#vehicles>. Consultado el 7 de diciembre de 2023.

Wang, M., Han, J., Dunn, J. B., Cai, H., & Elgowainy, A. (2012). Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. *Environmental Research Letters*, 7(4), 45905. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045905>.

Yan X., Tan D. K. T., Inderwildi O.R., Smith J.A.C., King D.A. 2011. Life cycle energy and greenhouse gas analysis for agave-derived bioethanol. *Energy & Environmental Science* 4, 3110-3121.

H. Zbed, J.N. Sahu, A. Suely, A.N. Boyce, G. Faruq, Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 71, 2017, Pages 475-501, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>.

ANEXO A. ECUACIONES UTILIZADAS PARA LA NORMALIZACIÓN DE LOS INDICADORES EN LA EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL 2G A PARTIR DE RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE TEQUILA.

Tabla A1. Ecuaciones usadas para la normalización de los indicadores de la producción de bioethanol a partir de Agave tequilana Weber (var. azul). Adaptada de Sacramento-Rivero et al., 2022.

Indicador	Método de normalización	Variables
Huella de carbono	$HCm = M^* = \frac{e^{Mt}}{e^M}$ $M = \frac{G_{ref} - G_b}{G_{ref}}$	<ul style="list-style-type: none"> • M^* = valor normalizado de la huella de carbono • Mt = Valor límite de la mitigación de las emisiones, expresado como fracción. • M = Mitigación de las emisiones de GEI por el sistema de bioenergía, expresado como fracción • G_{ref} = Emisiones de GEI del sistema de referencia (g CO2 eq/MJ) • G_b = Emisiones de GEI del sistema de bioenergía (g CO2 eq/MJ)
Huella hídrica	$HH = I_b^* = \frac{I_b}{I_t}$ $I_b = \frac{W_b}{E_b}$	<ul style="list-style-type: none"> • I_b^* = valor normalizado de la huella hídrica en el sistema de bioenergía. • Mt = Valor límite de la mitigación de las emisiones, expresado como fracción. • M = Mitigación de las emisiones de GEI por el sistema de bioenergía, expresado como fracción • G_{ref} = Emisiones de GEI del sistema de referencia (g CO2 eq/MJ) • G_b = Emisiones de GEI del sistema de bioenergía (g CO2 eq/MJ)
Ingreso	$Ingreso = \frac{AE_t}{AE}$ $AE = \frac{1}{12 * W_r} \sum_{i=1}^{W_r} AE_i$	<ul style="list-style-type: none"> • $Ingreso$ = Valor normalizado del Ingreso promedio per cápita. • AE = Ganancia per cápita promedio de los trabajadores directos en el sistema de biorefinería (\$/mes/trabajador). • AE_t = Límite de pobreza definido para la población rural en México (\$/mes/trabajador). • W_r = Número directo de trabajadores involucrados en el sistema de bioenergía. • AE_i = Promedio anual de ingreso por trabajador (\$/año).

Número de empleos	$NE = NE^* = \frac{DE_t}{DE}$ $NE = \frac{WT}{E_b^1}$	<ul style="list-style-type: none"> • NE= Valor normalizado del Número de empleos. • <i>NEt = Valor límite, corresponde al número de empleos por unidad de energía producida en el sistema de referencia (empleos/MJ).</i> • <i>NE = Tiempo neto de cada empleo por unidad de energía producida (empleo*año/MJ).</i> • <i>WT = Tiempo requerido en las actividades de recolección de biomasa y operación de la bioenergía generada por el sistema (empleo/año).</i> • <i>E'b = Energía total generada en el sistema de bioenergía, medido antes de la etapa de distribución y uso final de la misma (MJ).</i>
Costo de producción de bioetanol	$VNCB = \frac{CT_{PB}}{VCRT_{PB}}$	<ul style="list-style-type: none"> • <i>VNCB = valor normalizado del costo de la producción de bioetanol.</i> • <i>CTPB = Costo total de la producción de bioetanol en el sistema analizado sin tomar en cuenta su distribución ni uso final (\$/MJ).</i> • <i>VCRTPB = Valor del costo total de producción del biocombustible en el sistema de referencia sin tomar en cuenta su distribución ni uso final (\$/MJ).</i>

Tabla A2. Valores resultado en la evaluación de la sostenibilidad del Escenario 1.

Indicador	Valor obtenido en este trabajo ^a	Valor de referencia	Valor normalizado E1
Huella de carbono	622.38 g CO ₂ eq/MJ	1259 g CO ₂ eq/MJ (Zurita-García, 2021)	0.72
Huella hídrica	2.349 L H ₂ O/MJ	17.7 L H ₂ O/MJ (Zurita-García, 2021)	0.30
Número de empleos	0.92 x 10 ⁻⁶ empleos /MJ	0.689 x 10 ⁻⁶ empleos /MJ (Kim & Dale, 2015)	0.76
Salario			
Costo de producción (total)	3.23 MXN/MJ	2.77 MXN/MJ IRENA 2013,	2.78

^aValores promedio, en este ejemplo se muestran los valores obtenidos para el escenario 1

ANEXO B. GUÍA DE LAS PREGUNTAS REALIZADAS EN CAMPO. ADAPTADO DEL CUESTIONARIO REALIZADO POR EL DR. JULIO SACRAMENTO (UADY).

Buenos días. Nuestros nombres son Idania Valdez Vazquez, Christian Hernández Hernández, y Ana Laura Morales García. Somos un equipo de investigadores y estudiantes del Instituto de Ingeniería con sede en Juriquilla, Querétaro de la Universidad Nacional Autónoma de México que está evaluando el uso de agroquímicos, agua y combustibles fósiles, en la producción de agave tequilero, así como la generación de residuos de agave en las actividades agrícolas, el número de personas que laboran en todo el ciclo de cultivo, así como el ingreso percibido durante la cadena productiva del mismo. La siguiente entrevista pretende profundizar en cuestiones del desarrollo de la planta, los insumos utilizados y el uso de los residuos generados en campo al momento de la cosecha, además de información socioeconómica importante en la cadena productiva del agave tequilero que puedan dar un antecedente del potencial del uso de residuos en la producción de etanol.

DATOS

Fecha:

Nombre del productor:

Teléfono del productor:

Estado/Ciudad/Nombre del ejido/Nombre de la parcela

Grado de estudios:

*Dar hoja de presentación

*Firmar hoja de consentimiento que salga en los agradecimientos de la publicación

PREPARACIÓN DE TERRENO

1. ¿Cuántas hectáreas son en este terreno?
2. ¿Cómo prepara su terreno?
3. ¿En qué meses realiza la preparación del terreno?
4. ¿Qué maquinaria usa para la preparación del terreno?
5. ¿Cuántas veces usa la maquinaria para la preparación del terreno?
6. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria para la preparación del terreno?
7. ¿Cuánto diésel usa en la maquinaria?
8. ¿Usted usa la maquinaria?
9. ¿Cómo controla la maleza?
10. ¿Usa pesticidas?
11. ¿Cómo aplica el pesticida?

12. ¿Cuánto pesticida usa?
13. ¿Cuánto le cuesta el pesticida?
14. ¿Usted va y lo compra?
15. ¿Qué tan lejos lo compra?
16. ¿Usted hace la preparación del terreno?
17. ¿Le ayudan a hacer la preparación del terreno?
18. Entonces, ¿Cuántas personas trabajan para la preparación del terreno?
19. ¿Son trabajadores por temporada?
20. ¿Cuánto ganan aproximadamente estos trabajadores?
21. ¿De qué edad son estos trabajadores?
22. ¿Cuántas horas trabajan al día estos trabajadores en la preparación del terreno?
23. ¿Este terreno es de usted o es rentado?
 - Si es rentado ¿en cuánto lo renta y cuántas hectáreas renta?
 - Si es propio ¿Cuánto le costó el terreno?
24. ¿Cuál es el costo total de preparar el terreno?

CULTIVO

25. ¿Cómo adquirió los hijuelos?
 - a) compra, ¿dónde los compró? ¿cuál fue el costo del hijuelo?
 - b) Donación ¿Quién se los donó? ¿cuántos le donó?
26. ¿Cuál es el rendimiento de su cultivo por hectárea?
27. ¿En qué mes siembra y cosecha el agave?
28. ¿Qué cantidad de plantas de agave siembra por hectárea?
29. ¿Qué distancia existe entre las plantas?
30. ¿Cuál es la profundidad de la raíz del agave?
31. ¿Qué tipo de riego realiza en este cultivo?
32. ¿Cuánta agua usa para riego?
33. ¿De dónde viene el agua?
34. ¿Cuánto le cuesta el agua?

35. ¿Usa agua para otra actividad que no sea riego? ¿cuál y aproximadamente cuánta?
36. ¿Qué maquinaria usa para la siembra del cultivo?
37. ¿Cuántas veces usa la maquinaria para la siembra del cultivo?
38. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria para la siembra del cultivo?
39. ¿Cuánto diésel usa en la maquinaria para la siembra del cultivo?
40. ¿Usted usa la maquinaria para la siembra del cultivo?
41. ¿Usa pesticida para la siembra del cultivo?
42. ¿Cómo aplica el pesticida para la siembra del cultivo?
43. ¿Cuánto pesticida usa para la siembra del cultivo?
44. ¿Cuánto le cuesta el pesticida para la siembra del cultivo?
45. ¿Usted va y lo compra?
46. ¿Qué tan lejos lo compra?
47. ¿Usa fertilizante para el crecimiento de las plantas de agave?
48. ¿Cómo aplica el fertilizante para el crecimiento de las plantas de agave?
49. ¿Cuánto fertilizante usa para el crecimiento de la planta?
50. ¿Cuánto le cuesta el fertilizante para el crecimiento de la planta?
51. ¿Usted va y lo compra?
52. ¿Qué tan lejos lo compra?
53. ¿Usted hace la siembra de los hijuelos?
54. ¿Le ayudan a hacer la siembra de los hijuelos?
55. Entonces, ¿Cuántas personas trabajan en la siembra del cultivo?
56. ¿Son trabajadores por temporada?
57. ¿Cuánto ganan aproximadamente estos trabajadores?
58. ¿De qué edad son estos trabajadores?
59. ¿Cuántas horas trabajan al día estos trabajadores en la siembra del cultivo?
60. SOLO PARA AGAVE/CAÑA DE AZÚCAR: Oiga, y ¿cuántas hectáreas de las que están sembradas tienen un año, dos, y cuáles son las próximas a cosechar?

MANTENIMIENTO

61. ¿Cómo cuida a las plantas en su crecimiento?
62. ¿En qué meses realiza el mantenimiento del cultivo?
63. ¿Usa agua para el crecimiento de la planta?
64. ¿Cuánta agua usa para el crecimiento de la planta?
65. ¿De dónde viene el agua para el crecimiento de la planta?
66. ¿Cuánto le cuesta el agua para el crecimiento de la planta?
67. ¿Qué maquinaria usa para el crecimiento de la planta?
68. ¿Cuántas veces usa la maquinaria para el crecimiento de la planta?
69. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria para el crecimiento de la planta?
70. ¿Cuánto diésel usa en la maquinaria para el crecimiento de la planta?
71. ¿Usted usa la maquinaria para el crecimiento de la planta?
72. ¿Usa pesticida para el crecimiento de la planta?
73. ¿Cómo aplica el pesticida para el crecimiento de la planta?
74. ¿Cuánto pesticida usa para el crecimiento de la planta?
75. ¿Cuánto le cuesta el pesticida para el crecimiento de la planta?
76. ¿Usted va y lo compra?
77. ¿Qué tan lejos lo compra?
78. ¿Usa fertilizante para el crecimiento de la planta?
79. ¿Cómo aplica el fertilizante para el crecimiento de la planta?
80. ¿Cuánto fertilizante usa para el crecimiento de la planta?
81. ¿Cuánto le cuesta el fertilizante para el crecimiento de la planta?
82. ¿Usted va y lo compra?
83. ¿Qué tan lejos lo compra?
84. SOLO PARA AGAVE/CAÑA DE AZÚCAR: ¿Cada cuánto aplica pesticidas, fertilizantes y herbicidas al agave?
85. ¿Siempre es la misma cantidad?

86. ¿usa agua para preparar los pesticidas, fertilizantes? ¿cuánta más o menos?
87. ¿Usted hace el mantenimiento para el crecimiento de la planta?
88. ¿Le ayudan a hacer el mantenimiento de la planta?
89. Entonces, ¿Cuántas personas trabajan en el mantenimiento de su cultivo?
90. ¿Son trabajadores por temporada?
91. ¿Cuánto ganan aproximadamente estos trabajadores?
92. ¿De qué edad son estos trabajadores?
93. ¿Cuántas horas trabajan al día estos trabajadores en el crecimiento de la planta?

COSECHA

94. ¿Usa maquinaria durante la jima?
95. ¿Cuántas veces usa la maquinaria para la jima del agave?
96. ¿Cuánto tiempo usa la maquinaria para la jima?
97. ¿Cuánto diésel usa en la maquinaria para la jima?
98. ¿Usted usa la maquinaria para la jima de su agave?
99. ¿Cuántas personas trabajan en la jima?
100. ¿Son trabajadores por temporada?
101. ¿Cuánto ganan aproximadamente estos trabajadores?
102. ¿De qué edad son estos trabajadores?
103. ¿Cuántas horas trabajan al día estos trabajadores en la cosecha de la planta?
104. ¿Qué tipo de jima realiza?
105. ¿Usted a quién vende las piñas?
106. ¿En cuánto vende las piñas?
107. ¿Usted transporta las piñas o viene el comprador por ellas?
108. ¿sabe cuál es el costo de transportar las piñas al punto de venta?
109. En este terreno, usted solo siembra agave ¿o siembra otros cultivos?
110. ¿Y después de cosechar, hace rotación de tierra con otros cultivos? ¿Cuáles?

111. Disculpe, ¿usted recibe algún tipo de apoyo del gobierno para realizar la siembra de su cultivo?
112. ¿Tiene una idea de cuánto le cuesta en general todo el cultivo desde que prepara el terreno hasta que hace la cosecha?
113. ¿Durante el periodo de cultivo, ha tenido mermas?
- Si: ¿Como cuánto? ¿A qué se deben esas pérdidas?
114. SOLO PARA AGAVE: De las plantas perdidas a lo largo del periodo (ya sea por plagas, desastres naturales, etc.) ¿Les da un uso a esas plantas?
115. ¿Disculpe, usted le reporta a alguna organización acerca del estado de su cultivo?
- Si, ¿A quién?
 - ¿De qué forma lo reporta?
 - ¿Cada cuánto tiempo?

RESIDUOS

116. ¿Cuántos residuos genera aproximadamente durante la jima?
117. ¿Durante el mantenimiento hace podas de las pencas? ¿De eso cuánto más o menos será de residuo?
118. ¿Qué hace con los residuos generados?
119. ¿Qué cantidad de residuos se mantienen en el campo para la siguiente cosecha? ¿Qué cantidad de la cosecha deja en los campos para el siguiente cultivo?
120. Cuando deja los residuos en el campo ¿Disminuye la cantidad de fertilizante necesario para la siguiente siembra?
121. ¿Vendería una parte o totalmente los residuos del cultivo? ¿A quién se la vendería? ¿Para qué uso la vendería? ¿En cuánto la vendería?
122. ¿Cuánta agua emplea durante toda la producción? ¿Cuánta en cada etapa?
123. ¿Cuánto tiempo deja pasar entre la jima de su agave y la preparación de su terreno?

Le agradecemos su tiempo para responder a las preguntas realizadas, si tiene alguna duda o comentario para mejorar la entrevista nos gustaría escucharlo.

ANEXO C. GUÍA DE LAS PREGUNTAS REALIZADAS PARA DETERMINAR IMPACTOS DE LA PRODUCCIÓN DE TEQUILA.

FASE INDUSTRIAL

DATOS

Fecha:

Nombre del entrevistado:

Teléfono:

Estado/Ciudad/Nombre de la tequilera:

Grado de estudios:

*Dar hoja de presentación

*Firmar hoja de consentimiento que salga en los agradecimientos de la publicación

1. ¿De dónde provienen las piñas que utiliza en la producción de su tequila?
2. ¿Sabe de qué capacidad son los camiones que las transportan?
3. ¿Sabe más o menos cuánto diésel gastan esos camiones?
4. ¿Cuántas toneladas de piñas reciben diariamente en esta tequilera?
5. ¿En cuánto compran las piñas?
6. ¿Ese precio incluye el transporte?
7. ¿Cuántas personas realizan la labor de descarga y cocimiento de las piñas?
8. ¿Lavan las piñas antes de cocerlas?
 - Si: ¿Qué cantidad de agua usa?
 - ¿de dónde viene el agua?
 - ¿Paga alguna cuota por el agua que usa?
9. ¿Cómo realizan el cocimiento de las piñas?
 - Si son hornos: ¿Qué tipo de hornos son?
 - ¿Qué combustible usan? ¿cuánto combustible usan?
 - ¿Durante cuánto tiempo realizan la cocción de las piñas?
 - Si son autoclaves: ¿Cuánta electricidad usan?

El agua para el vapor, ¿de dónde viene?

¿Cuánta agua usan?

10. ¿Cuál es la capacidad de su horno/autoclave?
11. Si usa agua en este proceso, ¿utiliza bombas para transportarla?
12. ¿De qué capacidad son esas bombas?
13. Después de cocer las piñas, ¿generan algún tipo de residuos?
14. ¿cuáles y en qué cantidad?
15. ¿Qué hacen con esos residuos?
16. ¿Cómo transporta las piñas cocidas para molerlas/triturarlas?
Si es mecánico (bandas transportadoras): ¿cuánta electricidad usa en esta etapa?
¿Cuál es la capacidad del equipo?
¿Durante cuánto tiempo se lleva a cabo este proceso?
17. ¿Cómo realizan el proceso de trituración?
18. ¿Usan electricidad o algún tipo de combustible?
19. ¿Por cuánto tiempo aproximadamente?
20. Después del proceso de trituración, ¿qué residuos generan y qué hacen con ellos?
Si los vende: ¿a quién?
¿Sabe para qué los usan?
21. ¿Cuál es la capacidad de producción de esta planta?
22. ¿Cuántas personas laboran hasta esta etapa de la producción de tequila?
23. ¿Cuál es el salario que se le paga a las personas que laboran en la producción de tequila?
24. ¿Esos salarios incluyen prestaciones?
25. ¿Los empleos generados son temporales o permanentes?

ANEXO D. DATOS BASE PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL TRANSPORTE DE LA BIOMASA A LA BIORREFINERÍA

Tabla D1. Datos utilizados para el cálculo de la huella de carbono en el transporte de la biomasa a la biorrefinería.

Municipio que suministra la biomasa	Capacidad biorrefinería (t/día)	Tipo biomasa	de % biomasa con el que contribuye	Distancia (km) ^d
Tequila	E1: 200 t bagazo	Bagazo ^a	100	4
Tequila	E2: 200 t (bagazo + pencas)	Bagazo	78 (del total)	4
		Pencas ^b	22 (del total)	
Amatitán		Pencas ^c	22	12
Atotonilco el Alto		Pencas	17	160
Arandas		Pencas	61	192

^a Bagazo con un 50% de humedad; ^b Suponiendo que las pencas tienen un 30% de humedad; ^c El porcentaje de la biomasa de pencas con el que contribuyen para lograr el 22% del total; ^d Distancia de la tequilera a la biorrefinería en caso del bagazo, y del campo a la biorrefinería en el caso de las pencas.

ANEXO E. DATOS DE LA FRACCIÓN DE ASIGNACIÓN DE IMPACTOS UTILIZADA EN EL CÁLCULO DE IMPACTOS AMBIENTALES Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA BIOMASA DE A. tequilana Weber var. azul EN LOS SITIOS DE ESTUDIO.

Tabla E1. Fracción de productos y fracción de valor del cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul).

Producto	Fracción másica^a (f_p)	Fracción de valor^b (f_{vp})	Fracción de asignación (FA)
Piñas	0.476	0.979	0.977
Hojas	0.524	0.021	0.023
Total	1	1	1

^at biomasa en base húmeda; ^btomando en cuenta un costo de \$22,000/ t de piña, y un costo de biomasa de \$480/t.

Tabla E2. Fracción de productos y fracción de valor de las piñas de *Agave tequilana* Weber (var. azul) en la producción de tequila.

Producto	Fracción másica^a (f_p)	Fracción de valor^b (f_{vp})	Fracción de asignación de impacto (FAI)
Piñas			
Jugo	0.8	0.979	0.995
Bagazo	0.2	0.021	0.005
Total	1	1	1

^aTomando en cuenta que el 80% de la piña es jugo y el resto es bagazo; ^bel costo actual de la piña es \$22,000/t y de biomasa de \$480/t.

Tabla E3. Contenido de humedad de las muestras de bagazo recolectadas en distintas tequileras ubicadas en los municipios de interés, determinada utilizando diferencia de peso.

Municipio	Nombre de la tequileras	Contenido de humedad del bagazo (%)^a
Tequila	Tierra de Agaves	33.5
Amatitán	Tequila Selecto	78.4
El Arenal	Tequila Cascahuin	39.0
Amatitán	Tequila Miravalle/Agaveros Unidos de Amatitán	89.8
Atotonilco el Alto	Tequila Embajador	77.7
Atotonilco el Alto	Tequila El viejito	53.2
Arandas	Tequila Charro	43.2
Arandas	Casa tequileras de Arandas	35.1
Arandas	Casa Agave Azul	28.9
Tototlán	Tequileras La Madrileña	21.4

^aNota: resultante del promedio de tres muestras.

ANEXO F. DATOS DEL INVENTARIO DE EMISIONES ASOCIADAS AL CULTIVO DE A. tequilana Weber var. azul EN LOS SITIOS DE ESTUDIO.

Tabla F1. Muestra de información obtenida sobre la dosis total de productos aplicados durante el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) por etapa del ciclo correspondiente a mayo de 2012-abril 2018 en los sitios evaluados.

Amatitán			
	Producto	Ingrediente activo	Dosis promedio (kg ó L/ha)
Preparación del terreno	Plateau	Imazapic	0.21
Desinfección de hijuelos	Malathion	Malathion	1
	Enraizador	N	1
Plantación	No	NA	0
Mantenimiento	Urea ^a	N	296
	Fósforo	P	313.5
	Plateau	Imazapic	0.56
	Gramoxone + Glifosato	Gramoxone + Glifosato	26.6
	Furadan (en caso de tener presencia de picudo)	Carbofuran	8
	Orión	Amicarbazone	7.5
	Diurón	Diurón	7.5
Preparación del terreno^b	No	NA	0
Desinfección de hijuelos	No	NA	0
Plantación	Composta ^a	N	2000
Mantenimiento	Composta ^a	N	2000

Tabla F1 (Continuación). Muestra de información obtenida sobre la dosis total de productos aplicados durante el cultivo de *Agave tequilana* Weber (var. azul) por etapa del ciclo correspondiente a mayo de 2012-abril 2018 en los sitios evaluados.

Atotonilco el Alto			
	Producto	Ingrediente activo	Dosis promedio (kg ó L/ha)
Preparación del terreno	Combine	Tebuthiuron	0.75
	Plateau	Imazapic	0.75
Desinfección de hijuelos	Malathion	Malathion	1
	Busan	TCMTB	0.5
Plantación	No	NA	0
Mantenimiento	Poly feed ^a	N	0.95
	Malathion	Malathion	5
	Equation	Cymoxanil + Famoxadona	5
	Fertilizantes ^a	N	529
	Glifosato	Glifosato	25
Arandas			
	Producto	Ingrediente activo	Dosis promedio (kg ó L/ha)
Preparación del terreno	Gallinaza ^a	N	140
	Cal agrícola	K, óxido de calcio	5000
Desinfección de hijuelos	Enraizador	N, P	1
	Dimetoato	Dimetoato	1
Plantación	No	NA	0
Mantenimiento	Urea ^a	N	276
	Triple 16	N, P, K	600
	Paraquat	Paraquat	16

^a Se muestra solo la dosis de nitrógeno aplicado

^b Productores orgánicos

NA: No aplica