



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

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

Desarrollo y evaluación de una metodología de Huella de Carbono como herramienta para la formulación de lineamientos de políticas públicas en la producción de biocombustibles gaseosos en México

Tesis

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

presenta

Venecia Solórzano Villanueva

Ing. Bioquímica

Director de Tesis:

Dra. Maricela Villicaña Méndez

Co-Director:

Dr. Carlos Alberto García Bustamante

Morelia, Michoacán, noviembre 2019



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

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

Desarrollo y evaluación de una metodología de Huella de Carbono como herramienta para la formulación de lineamientos de políticas públicas en la producción de biocombustibles gaseosos en México.

Tesis

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

presenta

Venecia Solórzano Villanueva

Ing. Bioquímica

Director de Tesis:

Dra. Maricela Villicaña

Co-Director:

Dr. Carlos Alberto García Bustamante

Morelia, Michoacán, noviembre 2019

Agradecimientos

A la UMSNH por permitirme cursar un posgrado de gran calidad y por sus profesores, investigadores, administrativos y trabajadores de excelencia.

A la ENES Morelia, por permitirme utilizar sus instalaciones para el desarrollo del proyecto y abrirme las puertas en cada momento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Secretaría de Energía, ya que a través del programa “Clúster de Biocombustibles Gaseosos” (clave CONACYT-SENER 247006) quienes financiaron parte de esta investigación al permitir la obtención de datos de campo con dichos recursos.

A los integrantes del Área Estratégica 11 del CBG por sus valiosos aportes a este trabajo, así como al Área Estratégica 5 “Sustentabilidad y Políticas Públicas” del Clúster de Biocombustibles Sólidos por las capacitaciones brindadas.

Al Dr. Carlos García, por darme la oportunidad de participar en este proyecto, por sus grandes enseñanzas y apoyo en cada momento, así como su guía y motivación a lo largo de este posgrado.

A la Dra. Maricela Villicaña por su apoyo en cada momento y disposición, por motivarme a seguir con mis estudios y preocuparse no solo por mi formación académica si no también personal.

Al DR. Miguel Ángel Salinas, Ezequiel y Rafael Huirache, por sus valiosas contribuciones y comentarios durante la realización de este trabajo.

Al Lic. Joel Bonales por acompañarme a lo largo de este proyecto, por ser un gran compañero y equipo de trabajo, especialmente un gran amigo, gracias por cada momento, experiencia y aprendizaje que vivimos juntos, pero sobre todo por cada risa que compartimos.

Al M.C Paulo Navarrete por convertirse en este tiempo en mi mejor amigo, gracias por tu apoyo, por tus palabras y motivación cada día, gracias por escucharme y ser un muy buen amigo, gracias por confiar en mi para muchas cosas y convertirte en mi cómplice en cada momento.

A mi mamá por apoyarme en cada momento, en cada decisión que tome, por siempre estar para mi y enseñarme lo valiosa y capaz que soy de lograr lo que me proponga, te admiro y agradezco todo tu amor y todo lo que has hecho por mi.

A mamá y a mi hermana por su apoyo y cariño incondicional, gracias por estar siempre a mi lado y motivarme a ser mejor persona cada día.

A mi papá por su cariño y apoyo que siempre me ha dado.

A mi familia por todo su amor y buenos momentos que hemos pasado.

Contenido

RESUMEN	9
GLOSARIO	11
INTRODUCCIÓN	16
1.1 MARCO TEÓRICO	18
1.1.4. <i>Biogás</i>	22
1.1.4.2 <i>Digestión anaerobia</i>	25
1.1.5.1 <i>Huella de Carbono</i>	27
1.1.5.2 <i>ISO 14067</i>	28
1.1.5.3 <i>GHG Protocol</i>	29
1.1.5.4 <i>PAS 2050</i>	29
1.2 ANTECEDENTES	31
1.3 JUSTIFICACIÓN	33
1.4 HIPÓTESIS	35
1.5 OBJETIVO GENERAL	35
2. MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.3.1 <i>Cadena 1. Biogás a partir de aguas de tratamiento de agua residual</i>	44
2.3.2 <i>Cadena 2. Biogás a partir la Fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos</i>	47
2.3.3 <i>Cadena 3. Biogás a partir de Cultivo Energético</i>	51
3.RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO	53
3.5 DISCUSIÓN PRELIMINAR	67
CAPÍTULO 4. POLÍTICA PÚBLICA Y AMBIENTAL EN MÉXICO en materia de Cambio Climático	74
5. DISCUSIÓN	93
6.CONCLUSIONES	103
7. BIBLIOGRAFÍA	105
8. ANEXO 1	109

Índice de figuras

Figura 1. Alternativas de utilización del biogás y requerimientos de purificación.....	23
Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia.....	26
Figura 3. Metodología.....	36
Figura 4. Metodología PAS 2050.....	36
Figura 5. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de aguas residuales utilizando como uso final la G. de calor.....	45
Figura 6. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de aguas residuales utilizando como uso final la generación eléctrica.....	46
Figura 7. Biorreactores.....	46
Figura 8. Biorreactores.....	46
Figura 9. Paneles solares.	46
Figura 10. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de FORSU, utilizando como uso final la generación de calor.....	48
Figura 11. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de FORSU, utilizando como uso final la generación eléctrica.....	49
Figura 12. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de FORSU, para uso final en el transporte.....	50
Figura 13. Molino.	50
Figura 14. Biodigestores	50
Figura 15. Cárcamo.....	50
Figura 16. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de cultivo energético, utilizando como uso final la generación de calor.....	52
Figura 17. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de cultivo energético utilizando como uso final la generación eléctrica.....	52
Figura 18. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de cultivo energético utilizando como uso final en el transporte.....	53
Figura 19. HC por etapa para 2 usos finales: generación de calor y generación de electricidad.	55
Figura 20. HC para la cadena de generación de biogás a partir de lodos, uso final generación de calor.	57
Figura 21. HC para la cadena de biogás a partir de lodos, uso final generación eléctrica.	57
Figura 22. HC para la cadena FORSU, por etapa.	58
Figura 23. HC para la cadena FORSU, uso final generación de calor.....	61
Figura 24. HC para la cadena FORSU, uso final generación eléctrica.....	62
Figura 25. HC para la cadena FORSU, uso final transporte.....	63
Figura 26. HC para la cadena Cultivo Energético, uso final generación de calor..	66
Figura 27. HC para la cadena Cultivo Energético, uso final generación eléctrica..	66
Figura 28. HC para la cadena Cultivo Energético, uso final transporte.....	67

Figura 29. Comparacion de la HC para generación de calor, contra diversas fuentes fósiles.	70
Figura 30. Comparacion de la HC para generación eléctrica, contra diversas fuentes fósiles.	70
Figura 31. Comparación de la HC para transporte, contra diversas fuentes fósiles.	71
Figura 32. Metodología del Marco Lógico para la generación de Políticas Públicas.....	80

Índice de tablas

Tabla 1. Características generales del biogás.	22
Tabla 2. Principios en los que se basa PAS 2050.	30
Tabla 3. Comparación entre PAS2050, ISO 14067 y GHG Protocol.....	40
Tabla 4. Inventario de emisiones para la cadena de generación de biogás a partir de planta de tratamiento de aguas residuales. G1: Generación de calor. G2: Generación de electricidad.....	54
Tabla 5. Asignación energética para uso final G. de Calor (G1) y G. Eléctrica (G2). Se presenta el Poder calorífico (PC) del producto y coproducto.....	55
Tabla 6. Créditos asignados al sistema de agua residual.....	56
Tabla 7. Inventario de emisiones de GEI para la cadena FORSU. G1: Generación de calor. G2: Generación de electricidad. G3: Transporte.....	56
Tabla 8. Asignación energética para FORSU uso final G. de Calor, G. eléctrica y transporte.	59
Tabla 9. Inventario de ciclo de vida para la cadena cultivo energético. G1: Generación de calor. G2: Generación de Electricidad. G3: Transporte.....	63
Tabla 10. Asignación energética para G.1: Generación de calor. G2: Generación Eléctrica y G3: Transporte.	64
Tabla 11. Créditos al sistema cultivo energético.....	64
Tabla 12. HC para uso final como generación de calor. generación de electricidad y transporte.	65
Tabla 13. Matriz del marco lógico.....	82
Tabla 14. Porcentaje de combustible fósil que debe ser sustituido.....	86
Tabla 15. Comparación de iniciativas de Mitigación de GEI.....	94

RESUMEN

El uso de biogás como fuente de energía renovable puede presentar ventajas ambientales, como es la posible mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) con respecto a los combustibles fósiles. Es necesario que cualquier proyecto de generación de biocombustibles cumpla con criterios de sustentabilidad lo que incluye una minimización de emisiones de GEI durante su ciclo de vida. La Huella de Carbono (HC) es una metodología que permite identificar y contabilizar fuentes de emisiones de GEI dentro del sistema de generación de biogás, detectar puntos críticos susceptibles de mejoras, así como conocer el potencial de mitigación de este tipo tecnologías al compararlo con combustibles fósiles y que, además, los resultados obtenidos sean claros, transparentes y reproducibles. A partir de la comparación de las metodologías PAS 2050 e ISO14067, así como de otras metodologías específicas para el cálculo de la HC, se propuso una nueva metodología que considera las características en cuanto a tipo de suelo, vegetación, tecnología utilizada en las plantas de generación de biogás, así como factores de emisión de GEI de México. Esta metodología se aplicó a tres estudios de caso para la producción y aprovechamiento del biogás. En términos generales, se observa mitigación de GEI para la generación eléctrica con biogás en los estudios de caso analizados con respecto a la energía de la Red Mexicana. Esta mitigación puede ser mayor si se compara con otras fuentes de generación, como es el carbón mineral. En cambio, cuando se considera con un uso final térmico, se observó mitigación únicamente en la cadena de generación a partir de cultivo energético.

Hace falta estudiar las cadenas de una manera sistémica, en la cual se incluya el uso de residuos que de otra forma generarían impactos ambientales. Sin embargo, a partir de la investigación realizada, se generaron las siguientes recomendaciones de política: 1 Utilizar una metodología clara, transparente y coherente con México. 2. Prestar atención a los parámetros que presentan una mayor sensibilidad: almacén del digestato, porcentaje de fugas de CH₄ durante la digestión anaerobia, rendimiento de producción de biogás y tecnología empleada para la generación de energía. 3. Detallar contra que combustible fósil son comparados los resultados. 4. Tener una perspectiva sistémica de la generación de biogás que incluya no sólo la generación de energía, sino, además, el tratamiento a residuos y la sustitución de productos que podría resultar favorecedor para mitigar otro tipo de impactos ambientales.

Abstract

The use of biogas as a renewable energy source may present environmental advantages, such as the possible mitigation of greenhouse gases (GHG) with respect to fossil fuels. It is necessary that any biofuel generation project meets sustainability criteria, including minimization of GHG emissions. The Carbon Footprint (HC) is a methodology that allows identifying and accounting for sources of GHG emissions within the biogas generation system, detecting critical points susceptible to improvements, as well as knowing the mitigation potential of this type of technologies when compared with fossil fuels. In addition, the results obtained are clear, transparent and reproducible. Based on the comparison of the PAS 2050 and ISO14067 methodologies, a methodology was proposed that considers the characteristics in terms of soil type, vegetation, technology used in biogas generation plants, as well as GHG emission factors in Mexico. This methodology was applied to three biogas case studies. In general terms, GHG mitigation is observed for the generation of electricity with biogas with respect to the energy of the Mexican Network. This mitigation may be greater when compared to other sources of generation, such as mineral coal. On the other hand, with a thermal end use, mitigation was observed only in the chain from energy cultivation.

From the research carried out, the following recommendations were generated: 1. Use a clear, transparent and coherent methodology with Mexico. 2. Pay attention to the parameters that have a greater sensitivity: digestate storage, percentage of CH₄ leaks during anaerobic digestion, biogas production performance and technology used for power generation. 3. Detail against which fossil fuel the results are compared. 4. Have a systemic perspective of the generation of biogas that includes not only the generation of energy, but also the treatment of waste and the substitution of products that could be favorable to mitigate other types of environmental impacts.

Palabras clave: Huella de Carbono, Mitigación de GEI, biogás, PAS 2050, Política Ambiental

GLOSARIO

Almacén de Carbono: Depósito natural o artificial de C, que absorbe el C de la atmósfera y contribuye a reducir la cantidad de CO₂ del aire.

Análisis Bottom-up/: Este análisis sigue el criterio de empezar por la parte del mayor detalle posible, es decir desde una escala pequeña hasta lo más grande.

Análisis de ciclo de vida: Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida

Asignación: Distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes.

Biocombustibles: Cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa (tales como los cultivos energéticos, productos y subproductos pesqueros o acuícolas, residuos forestales, residuos orgánicos municipales (basura orgánica), excremento de animales, grasas y aceites de origen vegetal o animal).

Biocombustibles de primera generación: Son aquéllos provenientes de la biomasa, especialmente de cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana.

Biocombustibles de segunda generación: Se obtienen a partir de biomasa lignocelulósica. Esta biomasa procede de residuos de cultivos, de subproductos de las industrias alimentaria y forestal.

Biogás: Es una mezcla conformada principalmente por CH₄ (50%-70%) y CO₂ (25%-40%), que se genera por el proceso biológico de biodigestión anaerobia, que consta de una serie de reacciones bioquímicas en la que residuos orgánicos son degradados o consumidos por un conjunto de microorganismos.

Biomasa: Conjunto de materia biológicamente renovable, organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos.

Compromisos condicionados: Son aquellos compromisos que un país asume bajo la supuesta que recibirá ayuda económica, tecnológica o de alguna índole para el cumplimiento de los mismos, de no recibir dicha ayuda no se cumple el compromiso.

Co-producto: Material, producto o combustible comercializable entre dos o más materiales, productos o combustibles procedentes del mismo proceso unitario, pero que no es el objeto de la evaluación.

Criterio Cut-off: Especificación de la cantidad de materia o de energía o del nivel de importancia ambiental asociado a los procesos unitarios o al sistema del producto para su exclusión del estudio. Para este caso se considera a las emisiones que no producen cambios significativos (menos del 5%) en los resultados finales, no son contabilizados en la HC.

Directiva: Orden o línea que debe seguirse en un proceso. En política es un acto institucional comunitario que obliga a los estados miembros a conseguir un determinado resultado, dejándoles en libertad para escoger el medio y la forma adecuados para conseguir el resultado previsto.

DQO: Parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.

Datos de actividad: Se refiere a los datos que se obtienen en campo.

Enfoque Atribucional: Descripción de los flujos de entrada y salida del sistema y subsistemas estudiados

Enfoque Consecuencial: Descripción de cómo se ven afectados los flujos de entrada y salida por cada decisión tomada y se orienta a describir las consecuencias ambientales de las mismas.

Factores de emisión: Se define como un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante.

Gases de Efecto Invernadero: Son gases que se encuentran presentes en la atmósfera terrestre y que dan lugar al fenómeno denominado efecto invernadero. Los gases de invernadero más importantes son: vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) clorofluorcarbonos (CFC) y ozono (O₃).

Huella de Carbono: estima “la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto”.

ISO: (En inglés: International Standardization Organization) es una de las organizaciones internacionales que más viene concentrando esfuerzos en la normalización y su difusión en el mundo.

Lineamiento: Es una tendencia, una dirección o un rasgo característico de algo. También una explicación o una declaración de principios

PAS: (En inglés: Publicly Available Specification). Son documentos de estandarización. El objetivo de una Especificación Públicamente Disponible PAS es

acelerar la estandarización. Los PAS a menudo se producen en respuesta a una necesidad urgente del mercado.

Políticas públicas: Constituyen uno de los instrumentos socialmente disponibles para atender las necesidades de la población. Las Políticas Públicas tienen la potencialidad de resolver problemas concretos

Reglas de categoría de producto: Grupos de productos que pueden cumplir funciones equivalentes.

Sustentabilidad: capacidad de una actividad de mantenerse como opción viable para las generaciones futuras sin deteriorar los sistemas socioambientales que la sustentan (WCED, 1987).

Uso de suelo indirecto: Emisiones ocasionadas por la extensión del suelo con fines agrícola que se produce para compensar la parte de las tierras cultivables actuales que se dedican a producir biocombustibles.

Acrónimos

Mt: Mega toneladas

GEI: Gases de Efecto Invernadero

HC: Huella de Carbono

CC: Cambio Climático

CO₂: Dióxido de Carbono

CH₄: Metano

DQO: Demanda Química de Oxígeno

N₂O: Óxido nitroso

APF: Administración Pública Federal

PND: Plan Nacional de Desarrollo

CUSD: Cambio de uso de suelo

SV: Sólidos Volátiles.

RHALE: Reactor hidrolítico-acidogénico.

UASB: Reactor de lodo anaeróbico de flujo ascendente.

INTRODUCCIÓN.

Actualmente existen dos grandes problemáticas que enfrenta el mundo en materia energética: la alta dependencia de combustibles fósiles y los impactos ambientales causados por éstos. A partir de la revolución industrial, se observó la presencia de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos derivados de los procesos productivos, principalmente CO₂, CH₄ y N₂O, los cuales están relacionados con el aumento en la temperatura del planeta. Aunado a esto, en 1970 comenzó la crisis del petróleo que provocó gran interés a nivel mundial en el desarrollo de biocombustibles como fuente alterna al uso de combustibles derivados de petróleo (IPCC, 2007; Timilsina & Shrestha, 2011)

Por su parte, México presenta una alta dependencia de los combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades de energía, Según datos de la Secretaría de Energía (SENER), en el 2017 la generación total de energía primaria en México fue de 7027 PJ, de los cuales, el 84.5% fue generada mediante combustibles fósiles. La producción de energía primaria mediante fuentes no fósiles ha ido incrementando en la matriz energética, pasando de ser 9.9% en 2016 a 11.1% en 2017 (SENER, 2018). Sin embargo, sigue existiendo una alta dependencia a los combustibles fósiles, razón suficiente para buscar fuentes energéticas alternativas. No obstante, la razón que cobra cada vez más fuerza para impulsar el desarrollo y generación de combustibles alternativos como los biocombustibles, los cuales se definirán más adelante, tiene que ver con evitar los impactos negativos del calentamiento global, el cual tiene como causa el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI). Al aumentar la concentración de GEI en la atmósfera, aumenta proporcionalmente la Temperatura promedio de la Tierra, lo que podría llegar a afectar gravemente los ecosistemas tal y como los conocemos ahora, por lo tanto, la problemática del cambio climático se relaciona directamente con el "efecto invernadero" (F. M. Vanek, L. D. Albright, 2012).

México emitió 683 MtCO_{2e} de GEI en el 2015, de las cuales, el 25.1 % proviene del sector transporte, en tanto que el 24.1% de estas emisiones corresponde al sector energético (INECC, 2018), por lo cual es indispensable disminuir su huella de carbono y buscar fuentes de energía alternativa que puedan ofrecer una solución ante esta problemática. Por esta razón se ha reconocido la importancia de desacoplar el desarrollo económico de México del uso de combustibles fósiles (Teske, Zervos, & Schafer, 2007). En este contexto, el uso de biocombustibles como fuente de energía renovable puede presentar importantes ventajas para el país, ya que los biocombustibles podrían presentar reducción de GEI al compararse con la ocasionada por combustibles fósiles; permitiría disponer de combustible seguro e independiente de cambios en el precio del mercado, además, es una alternativa viable ante el aumento en el costo de la extracción y refinación del petróleo, cuyos

procesos presentan mayores impactos ambientales; pueden contribuir a disminuir emisiones de CH₄ ocasionada por la fermentación de biomasa) y reduce el impacto ambiental negativo que genera una inadecuada disposición final de residuos orgánicos. No obstante, la bioenergía en general puede tener también impactos ambientales negativos tales como la disminución en la disponibilidad de alimento, uso de suelo indirecto y desplazamiento de especies. Además, mediante la creación de un mercado para los residuos agrícolas, el aumento de la demanda de energía podría desviar residuos a la producción de biocombustibles si no se gestiona adecuadamente, y ello podría tener efectos potencialmente negativos en la calidad del suelo, especialmente en su contenido en materia orgánica (FAO, 2008). Aunado a esto, en función de los métodos empleados para producir la materia prima y elaborar el combustible, algunos cultivos pueden generar aún más gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles. Estas son algunas de las razones por las que cualquier proyecto referente a la generación de energía renovable, cumpla con principios de sustentabilidad lo que incluye una mitigación real de emisiones de GEI que se producen durante su cadena de suministro energético. La huella de carbono se ha empleado como metodología que permite estimar las emisiones de GEI en el ciclo de vida de tecnologías energéticas (Galindo & Caballero, 2010).

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Cambio climático y el sector energético.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ocurre en la atmósfera terrestre. Inicia cuando la radiación solar atraviesa la superficie terrestre en forma de ondas de longitud corta. Parte de esta radiación es absorbida por los gases presentes en la atmósfera, otra porción es reflejada, a la que se le conoce como albedo, y la restante llega a la superficie de la Tierra para que después ésta sea reemitida por la Tierra a longitudes de onda en el infrarrojo. Sin este efecto natural, la temperatura promedio de la Tierra estaría por debajo del punto de congelamiento del agua y haría imposible la vida como la conocemos (IPCC, 2007).

Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases traza que se encuentran en la atmósfera. Los siete gases más importantes que regula el protocolo de Kioto son: Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O), Hidrofluorocarbonos (HFCs), Perfluorocarbonos (PFC), Hexafluoruro de azufre (SF₆) y Trifluoruro de nitrógeno (NF₃). Cada uno tiene un potencial global de calentamiento diferente (Pagés & Arshad, 2014). El GEI más importante es el CO₂ ya que contribuye aproximadamente al 64% del forzamiento radioactivo. Las principales causas de las emisiones de CO₂ son la quema de combustibles fósiles y la deforestación (Cuatecontzi & Gasca, 2007).

En México, las emisiones de GEI durante el 2015, fueron de 683 MtCO_{2eq}. Del total de emisiones, el 64% corresponde al consumo de combustibles fósiles, 10% al sector pecuario, 8% a procesos industriales, 7 % manejo de residuos, 6% emisiones fugitivas por extracción de petróleo, gas y minería y 5% actividades agrícolas. Respecto a los sectores, en el 2015, el sector energético es el que genera mayores emisiones de CO₂, emitiendo 481 MTCO_{2eq}, lo que equivale al 70% de las emisiones cuantificadas para ese año, seguido del sector ganadero (INECC & SEMARNAT, 2015).

Se espera que el aumento de la población, el crecimiento económico y la falta de políticas de mitigación en materia de GEI, seguirán impulsando la demanda energética con el consecuentemente aumento de los GEI en la atmósfera. El sector energético, como lo define el IPCC, comprende “todos los procesos de extracción, conversión, almacenamiento, transmisión y distribución de energía con excepción de aquéllos que utilicen la energía en sectores de uso final” (Edenhofer et al., 2014). En México, para el año 2017, se generó un total de 7,027 PJ de energía primaria, de estos, solo 367.2 PJ fue generada a partir de biomasa, lo que equivale al 5.23% del total nacional para ese año (SENER, 2018).

Es sumamente probable que el origen del cambio climático se pueda atribuir a la emisión masiva de los denominados GEI a la atmósfera, principalmente las

emisiones de origen antropogénico. Tan sólo en el 2018, las emisiones mundiales de CO₂ aumentaron un 1.7%, a un máximo histórico de 33.1 Gt CO₂ (IEA, 2018). El Cambio Climático, según la LGCC, es: “la variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables” (CDHCU, 2016).

El Cambio Climático es un fenómeno que preocupa a las autoridades de México debido a los impactos asociados, por ejemplo, un aumento en la temperatura se traduciría en la evotranspiración lo que implicará una sobreexplotación de los acuíferos por una creciente demanda para riego, esto indica que los procesos de adaptación son complejos y tienen consecuencias colaterales; Aunado a esta problemática, no existen incentivos suficientes para la preservación de la biodiversidad, lo que hace probable un escenario de pérdida de un gran porcentaje de la misma (Uriberto, 2015) Los impactos ambientales potenciales esperados son en diversos sectores económicos: agropecuario, hídrico, biodiversidad, turismo y salud de la población. Las consecuencias del cambio climático para México, son distintas en cada región, sin embargo, las estimaciones para el país muestran que las consecuencias económicas negativas superan a las ganancias temporales en el largo plazo y que existen límites de tolerancia para permitir consecuencias negativas. En este contexto, es indispensable diseñar una estrategia de crecimiento económico para México que permita transitar a una economía baja en emisiones de carbono (Galindo & Caballero, 2010).

Otros de los impactos más significativos atribuibles al cambio climático son: aumento de la temperatura promedio global de los océanos y la superficie terrestre, aumento promedio del nivel del mar, acidificación del mar, alteración de la flora y fauna marina, modificación de los patrones de precipitación, inundaciones recurrentes, incremento en el número e intensidad de huracanes, sequías prolongadas, aumento en el número de días y noches cálidas a nivel global, ondas cálidas más frecuentes y pronunciadas en Europa, Asia y Australia, disminución en la disponibilidad de agua para consumo humano, agrícola e hidroeléctrico, disminución en la productividad agrícola, reducción y adelgazamiento de las capas de nieve en Groenlandia y la Antártica, disminución de los glaciares a nivel mundial, disminución de la capa de nieve primaveral del Hemisferio Norte, pérdida de biodiversidad y cambio en la composición de los ecosistemas, mayor propensión a incendio forestales, alteración de los ciclos biológicos y distribución geográfica de la flora y fauna, alteración de los vectores de enfermedades infecciosas en ciertas áreas, aumento, en Europa, de la mortalidad a causa del aumento de las temperaturas, etc (INECC, 2018). Estos potenciales impactos ambientales son razones suficientes para buscar alternativas que permitan mitigar las emisiones de GEI y el consecuente cambio climático.

1.1.2 Mitigación del cambio climático y México

La mitigación en materia de emisiones, es la “aplicación de políticas y acciones destinadas a reducir las emisiones de las fuentes, o mejorar los sumideros de gases y compuestos de efecto invernadero”(CDHCU, 2016).

El primer acuerdo importante sobre mitigación del Cambio climático se llevó a cabo en el tratado de La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático CMNUCC en 1997, dando origen al Protocolo de Kioto, el cual extiende los alcances de la CMNUCC que tiene el objetivo de reducir las emisiones de seis gases de GEI en por lo menos un 5%. Dentro de este acuerdo, los países industrializados se comprometían a reducir sus emisiones de GEI. Entró en vigor en 2005, y cada uno de los países adheridos adoptó distintos acuerdos voluntarios de reducción de emisiones. México se unió a la CMNUCC en 1992, comprometiéndose a trabajar, junto con otros países, para estabilizar los GEI.

En la Convención de las Partes del CMNUCC número 21 (COP21), México firma y ratifica el Acuerdo de Paris, comprometiéndose dos componentes, uno de mitigación y otro de adaptación. En el marco del Acuerdo de Paris México asumió compromisos no condicionados para realizar acciones de mitigación que tengan como resultado la reducción del 22% de sus emisiones de GEI al año 2030, lo cual significa una reducción de alrededor de 210 mega toneladas de GEI (INECC, 2015). Además, La Ley de Transición Energética publicada en el Diario Oficial de la Federación en 2015 (DOF, 2015) establece que para el 2024, las energías limpias deben cubrir al menos el 35% de la producción de electricidad, mientras que la Ley de Cambio Climático publicada en el 2016 en el mismo diario (DOF, 2016) fija el objetivo de reducir las emisiones de GEI en un 30% para el 2020, en comparación con las emisiones del año 2000.

La sustitución de un combustible con altas emisiones de carbono por una alternativa que represente menores emisiones de las mismas, así como mejorar la eficiencia energética en la transmisión y distribución de energía podría ayudar a reducir las emisiones de GEI (European Climate Foundation (ECF), World Energy Council (WEC), Cambridge Judge Business School (CJBS), & Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL), 2014). Las fuentes de energía renovable tienen un importante potencial para reducir las emisiones de GEI.

1.1.3 Fuentes renovables de energía

Las fuentes renovables de energía se definen según la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) como “formas de energía que tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo de vida de un ser humano en el planeta, y cuyo aprovechamiento es técnicamente viable. Para una fuente

potencialmente renovable el ritmo o la tasa sostenible de explotación no puede ser mayor que la tasa de regeneración” (Fernández, Montiel, Millán, & Badillo Jesús, 2012).

Dentro las energías limpias, se encuentran las producidas a partir de bioenergía. Éstos son definidos en la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos como: “combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades, agrícola, pecuaria, silvícola, acuacultura, algacultura, residuos de la pesca, domésticas, comerciales, industriales, de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos, por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad competente en los términos de esta Ley” (CEDRSSA, 2007). El potencial energético de los recursos biomásicos se define como: “la cantidad de biomasa que puede utilizarse con fines energéticos de manera sostenible a partir de estas fuentes primarias y secundarias” (García Bustamante & Cerutti Masera, 2016)(García & Masera, 2016).

Es posible obtener bioenergía de estos, debido a los átomos de carbón presentes en la biomasa, que se obtienen mediante el proceso de fotosíntesis. En este proceso, el CO₂ atmosférico se convierte en los compuestos orgánicos que se encuentran en el organismo vivo. A través de este proceso se producen diferentes compuestos como proteínas, grasas y azúcar que pueden actuar como una fuente de energía.

Los biocombustibles se pueden clasificar de acuerdo al insumo o materia prima y a la tecnología empleada para producirlos. De acuerdo a la materia prima pueden obtenerse de: residuos sólidos municipales (RSM), aguas residuales municipales, desechos industriales, abonos de animales, biomasa como cultivos energéticos, cultivos agrícolas, residuos forestales, de la agricultura, ganadería, silvicultura, así como materia prima de almidón, materia prima de celulosa como cultivos alimenticios, madera, aserrín, hierbas, desechos de procesos domésticos e industriales, grasa animal y aceite vegetal de colza, mostaza, soja, girasol, palma, planta de *Jatropha*, estiércol seco, algas, hongos y diferentes microorganismos (Singh & Kumar, 2017). También pueden clasificarse en biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

1.1.4 Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos se producen durante el proceso de gasificación de la biomasa que es una degradación térmica o microbiana de las sustancias de la biomasa. El correcto manejo de los residuos orgánicos se logra a través de diferentes tratamientos que implican reciclaje de estas materias orgánicas,

transformándolas en productos con valor agregado. Existen dos principales biocombustibles gaseosos: biogás y biometano.

1.1.4. Biogás.

La generación de biogás se lleva a cabo mediante una digestión anaerobia, el cual es un proceso biológico complejo y degradativo que parte de los materiales orgánicos de un sustrato, las cuales son sustancias biodegradables orgánicas enteras como la madera y el papel que se recogen de la basura. Todos estos materiales de desecho son convertidos en biogás, el cual es una mezcla de CO₂ y CH₄ con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (Ferrer, Uggetti, Poggio, Davide, 2017; Singh & Kumar, 2017). El biogás presenta características específicas que le confieren su potencial para ser utilizado como una fuente importante de generación de energía (Tabla 1). El metano es el componente principal que brinda el poder calorífico al biogás, sin embargo, el contenido de hidrógeno es proporcional al poder calorífico del mismo (Limón Macías, 2013).

Características principales del biogás	
Composición	55-70% CH ₄ ; 30-45% CO ₂ ; Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0-6.5 KW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60-0.65 L petróleo/m ³ biogás
T de ignición	650-750 C
T crítica	-82.5 C
Densidad	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (SO ₂)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Tabla 1. Características generales del biogás. Tomado y modificado de (Deublein & Steinhauser, 2008).

El biogás es un producto renovable y biocombustible versátil que se puede utilizar en la producción de calor o vapor, generación de electricidad, cómo combustible de vehículos o incluso, se puede convertir en biometano. Dependiendo del uso final que tendrá (Figura 1) es necesario eliminar impurezas de la composición del biogás por dos razones principales: para aumentar el poder calorífico del biogás y para cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustible, vehículos, etc.).

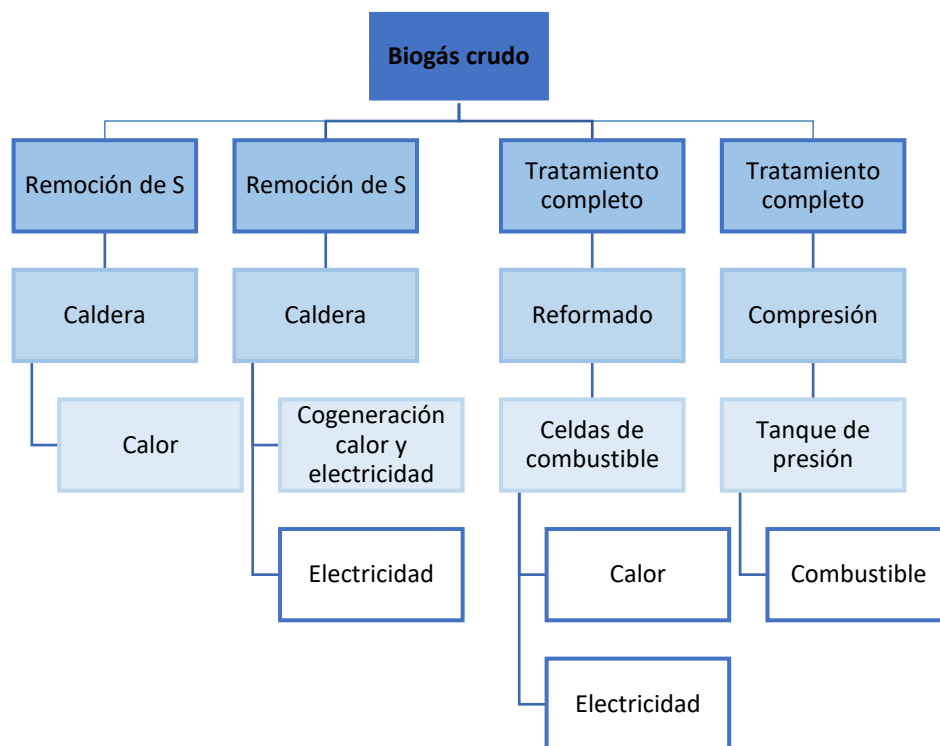


Figura 1. Alternativas de utilización del biogás y requerimientos de purificación. Tomado y modificado de (Singh & Kumar, 2017).

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y el digestato. Algunos de los compuestos que deben ser eliminados son principalmente el CO₂, vapor de agua y otros gases traza del biogás, proceso al que se le llama “tratamiento completo”, mientras que el “reformado” es la conversión de metano en hidrógeno (Singh & Kumar, 2017). Las partículas sólidas en el biogás se filtran con los colectores de partículas convencionales. Para la remoción de gases traza, las técnicas utilizadas son el lavado, adsorción y secado.

Los principales sustratos que se pueden utilizar para la generación de biogás, son: cultivos energéticos, residuos agrícolas, ganaderos, industriales, la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), aguas residuales urbanas e industriales y lodos de tratamiento de aguas residuales. El tipo de residuo empleado, así como los parámetros ambientales y operacionales condicionan la producción de biogás por unidad de biomasa, así como la composición del producto final. La utilización de cualquier sustrato presenta distintas ventajas e inconvenientes, así como diferentes potenciales de producción de biogás, debido a la carga orgánica

del sustrato, biodegradabilidad y composición de la misma (E. Campos, A. Bonmatí, M.R. Teira, 2001). Es por esto que es necesario evaluar cada etapa de la producción del biocombustible, con la finalidad de conocer el impacto ambiental que se tiene en cada una de ellas ya que necesariamente contendrá todavía una parte de materia orgánica, y su calidad dependerá de los parámetros de control del proceso.

En general, los residuos orgánicos industriales y la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos presentan altos potenciales para la producción de biogás. Sin embargo, los residuos ganaderos y lodos de depuradora presentan mayores potenciales para su generación (Cuadros, 2007).

En México la mayor parte del FORSU es depositado en vertederos al aire libre y las aguas residuales municipales son vertidas a los afluentes y playas, lo que se traduce en potenciales fuentes de contaminación ambiental por las bacterias y parásitos que podrían contener. Sin embargo, esos residuales pueden ser tratados mediante un proceso de descomposición anaerobia a través de su co-digestión, llamado también tratamiento anaerobio (Sánchez & Vizcón, 2017). A partir que este tratamiento se eliminan organismos patógenos que habitan los residuales y remueve de manera natural la DQO produciendo biogás como combustible con potencial para utilizarse en la generación de energía térmica e incluso eléctrica. Además, la producción de biogás genera residuales, los cuales pueden, potencialmente, ser usados como fertilizantes en la agricultura. Estos fertilizantes tienen la ventaja sobre los fertilizantes convencionales que son obtenidos sin los requerimientos regulares de energía, materia prima y los consecuentes impactos ambientales.

Biometano

El biometano se produce a partir de la depuración del biogás generado por digestión anaerobia, reduciendo los gases no combustibles y aumentando el contenido de CH₄ alrededor de 90% (Souza & Schaeffer, 2013). Para la purificación del biogás, se pueden utilizar microorganismos que remueven las sustancias consideradas contaminantes, especialmente para la eliminación de sulfuro de hidrógeno (Varnero, 2011).

El biometano tiene diferentes posibles usos, como son: combustible vehicular, en sistemas de refrigeración industrial, equipos de tratamiento térmico, estufas y hornos industriales, equipos de calefacción, climatización, combustible agrícola, motores de combustión interna, turbinas, etc (Singh & Kumar, 2017).

1.1.4.2 Digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia, a diferencia de los procesos aerobios, transcurre con un menor desprendimiento calorífico, lo que determina un mayor contenido energético de los productos resultantes y consecuentemente, un mayor rendimiento energético del proceso (E. Campos, A. Bonmatí, M.R. Teira, 2001). En este proceso más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en CH₄, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano, contrario a un sistema aeróbico, donde 50% de la energía es transformada.

“En la digestión anaerobia, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorias y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas” (Varnero, 2011). Es así como los residuos orgánicos se transforman en biogás. El proceso anaeróbico se clasifica como fermentación anaeróbica o digestión anaeróbica dependiendo del tipo de aceptores de electrones.

En la fermentación anaerobia, el aceptor final de electrones es siempre una molécula orgánica, por lo que es catabolizada mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad, los cuales aceptan los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones. La mayor parte del CH₄ se produce mediante fermentación anaeróbica en el cual el acetato actúa como dador y aceptor de electrones. La producción de CH₄ mediante esta vía se conoce comúnmente como metanogénesis acetotrófica (Varnero, 2011).

En cambio, la respiración anaeróbica es un proceso en el que el aceptor final de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno (CO₂, SO₄ o NO₃). Para realizar este proceso las bacterias participantes utilizan una cadena transportadora de electrones diferente a la de las mitocondrias en la respiración aeróbica. La energía liberada es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaeróbica ya que cuando los electrones son aceptados por el CO₂ se reduce a gas CH₄. La producción de CH₄ mediante esta vía se conoce como metanogénesis hidrogenotrófica y es responsable de un tercio de la producción total de CH₄. La digestión anaerobia se divide en 4 etapas que involucran diferentes grupos de microorganismos (figura 2):

1. Hidrólisis: En esta etapa las moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) son hidrolizadas por enzimas extracelulares.

2. Etapa fermentativa o acidogénica: En esta etapa las moléculas orgánicas solubles son fermentadas en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas.

3. Etapa acetogénica: En esta etapa los compuestos como etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos son metabolizados mediante bacterias acetogénicas produciendo como único producto ácido acético.

4.-Etapa metanogénica: Durante esta etapa los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente.

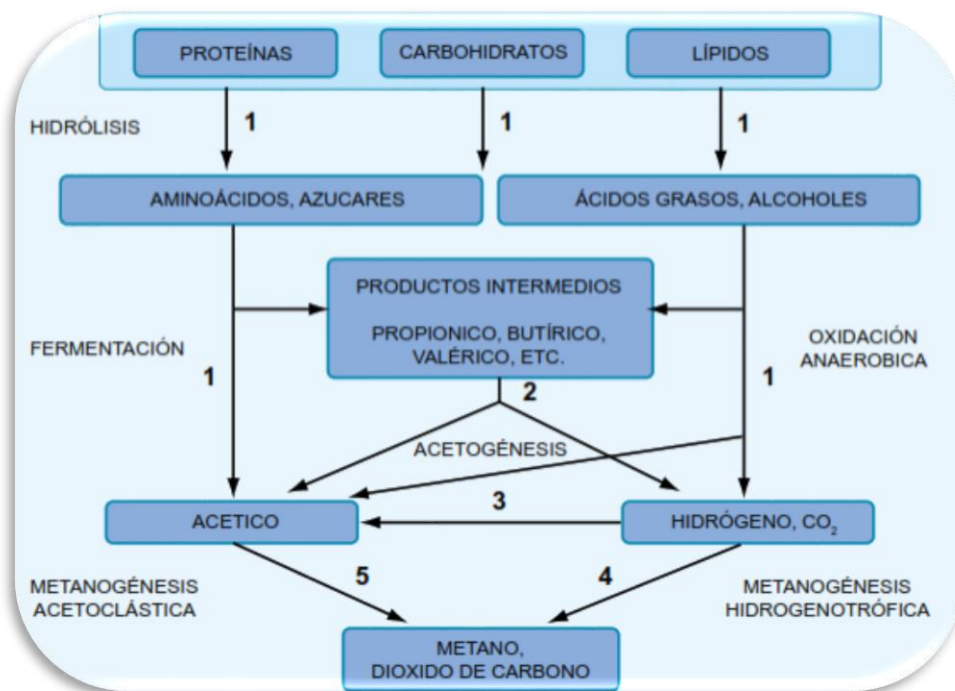


Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia. Tomado y modificado de (Varnero, 2011).

1.1.5 Metodologías de evaluación de emisiones de GEI de tecnologías energéticas.

A pesar de que los biocombustibles pueden presentar importantes ventajas a nivel mundial, el impacto ambiental que se genera durante su ciclo de vida ha sido cuestionado, principalmente en cuanto a la huella de carbono se refiere. Para evaluar tecnologías energéticas se emplean principalmente dos metodologías: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la Huella de Carbono (HC).

El ACV es una metodología que tiene como finalidad la evaluación de posibles impactos ambientales, así como la generación de información útil para la orientación de políticas públicas y legislación ambiental, la toma de decisiones de los tres órdenes de gobierno y los sectores industrial y social (Aguilar, Campos, & Avila, 2013). Dicha metodología está estandarizada en una serie de normas internacionales: UNE-EN-ISO 14040/044. El ACV, dependiendo de la metodología para la evaluación que sea seleccionado, puede evaluar varias categorías de impacto ambiental: uso de suelo, agotamiento de recursos abióticos, cambio climático, agotamiento del ozono estratosférico, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación, eutrofización y toxicidad (Curran, 2012).

Sin embargo, para fines de esta investigación se utilizará únicamente la Huella de Carbono como metodología de evaluación de emisiones de GEI de tecnologías energéticas, biogás en este caso.

1.1.5.1 Huella de Carbono

La HC, estima “la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto” (Carbon Trust and Defra, 2008). Puede ser útil como base para la identificación de puntos críticos dentro de un proceso que requieran mejoras o rediseños con el objetivo de disminuir el impacto ambiental asociado a la producción de biocombustible (Hoefnagels, Smeets, & Faaij, 2010). Este método de análisis es adecuado para analizar todo el proceso de emisión de carbono desde el punto de vista del ciclo de vida, considerando las fuentes de emisión de GEI (Carbon Trust and Defra, 2008).

En algunos casos la HC se utiliza como una versión simplificada de un ACV en el que se considera únicamente una categoría de impacto ambiental relativa a Calentamiento Global (Pergua & Castillo, 2011). La HC permite cuantificar las emisiones de GEI que son liberadas a la atmósfera como consecuencia de una serie de actividades necesarias para la obtención del producto, desde la extracción de materias primas hasta el tratamiento de sus residuos. A través de su análisis se hace una medida del impacto de las actividades antropogénicas.

Existen metodologías para evaluar la HC específicas para: actividades, organizaciones, proyectos y producto. Estas metodologías pueden contener datos generales o específicos de un sector y en ocasiones se crean para su aplicación específica a una legislación o normativa con el objetivo de sensibilizar sobre la problemática del cambio climático a la población (Pergua & Castillo, 2011).

Actualmente existe una serie de estándares y metodologías para estimar la HC de productos y tecnologías energéticas a nivel mundial, principalmente destacan la PAS 2050, GHG Protocol e ISO 14067, así como otros estándares a escala

nacional: Bilan Carbone, TS-Q0010, PCF Projekt, entre otras. Las metodologías implementadas para la evaluación de la HC presentan obstáculos en su implementación, debido principalmente a que el método de contabilización de los GEI, depende del contexto y la región donde se analice (Liu, Wang, & Su, 2016); así como el alcance del análisis o las suposiciones particulares también difieren en cada evaluación (Moran & Kanemoto, 2017), lo que se traduce en informes de emisión de GEI poco consistentes y transparentes. Por esta razón surgieron distintas Metodologías internacionales que intentan implementar especificaciones de evaluación que puedan ser utilizadas a nivel internacional y que además ofrezcan transparencia.

Las diferencias más significativas entre estas metodologías, son: la inclusión del “Tier III (se refiere al nivel de fiabilidad de un centro de datos asociados a cuatro niveles de disponibilidad, siendo el Tier I el nivel más bajo de fiabilidad y así sucesivamente), criterios de asignación de emisiones, inclusión del uso y disposición final del producto, inclusión de emisiones provenientes de bienes capitales (infraestructura), tipo de datos utilizados, emisiones de cambio de uso de suelo, entre otros”(García Bustamante & Cerutti Masera, 2016).

A continuación, se describe brevemente cada una de las metodologías más utilizadas a nivel internacional para el cálculo de la HC.

1.1.5.2 ISO 14067

En 2013 se creó ISO 14067 que es el método más recientemente publicado, basándose en estándares existentes para la cuantificación de las emisiones de GEI (Liu et al., 2016).

La norma ISO 14067 es una especificación técnica que detalla los principios, requisitos y directrices para la cuantificación y comunicación de la HC de productos, con base en las emisiones y eliminaciones de GEI durante su ciclo de vida. Se basa en la ISO 14040 e ISO 14044 para su análisis y para su posterior declaración y etiquetado se basa en ISO 14020, ISO 14024 e ISO 14025 (AEC, 2016; ISO14067, 2013).

Facilita el desarrollo de reglas de categoría de producto HCP (HCP-RCP), o la adopción de reglas de categoría de producto (RCP) que hayan sido desarrolladas de acuerdo con ISO 14025. Solo abarca una categoría de impacto: cambio climático (AEC, 2016; ISO14067, 2013).

1.1.5.3 GHG Protocol

El GHG Protocol surgió en 1988 cuando World Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) reconocieron la necesidad de un estándar internacional que permitiera la contabilización y posterior comunicación de los GEI corporativos. El principal objetivo de este Estándar es proporcionar una guía detallada adicional sobre la evaluación de las emisiones de GEI, y funcionar de forma internacional (Liu et al., 2016).

La primera edición del Estándar fue publicada en 2001, su misión fue desarrollar normas y herramientas de contabilidad e informes de GEI internacionalmente aceptados, y promover su adopción con el fin de lograr una baja economía de emisiones a nivel mundial. El GHG Protocol una especificación técnica para estandarizar el proceso de cuantificación, así como los estándares ISO y la primera versión de PAS 2050. El protocolo de GHG ha producido los siguientes estándares, protocolos y directrices: 1) Protocolo de GEI Contabilidad e informes corporativos Estándar (2004). 2) Cadena de valor corporativa del Protocolo de GEI (Alcance 3) (2011). 3) Protocolo de GEI para contabilidad de proyectos (2005): Una guía para cuantificar la mitigación de GEI derivada de proyectos. También conocido como el Protocolo de Proyecto. 4) Protocolo de GEI para el sector público de E.U.A. (2010): Un enfoque paso a paso para medir y reportar emisiones de organizaciones del sector público, complementario al Estándar Corporativo. 5) Pautas del protocolo de para cuantificar la mitigación de GEI de proyectos de electricidad conectados a la red (2007): una guía para cuantificar las reducciones en las emisiones que generan o reducen el consumo de electricidad transmitida a través de redes eléctricas, para ser utilizada en conjunción con el Protocolo del Proyecto.

La utilidad principal de GHG protocol, se resume en 4 acciones: Permite preparar inventarios de los GEI, simplifica y reduce costos de inventariar los GEI, ofrece información para planear estrategias de gestión y reducción de GEI, así como facilitar la transparencia en el sistema de contabilización de las mismas.

1.1.5.4 PAS 2050

En 2011, se creó PAS 2050 con la finalidad de generar un método estandarizado que permita la evaluación de GEI emitidos durante el CV de un producto. Se basa en la evaluación del CV con métodos establecidos a través de la ISO 14040 e ISO14044 y adapta estos enfoques al objetivo específico de determinar la HC de los productos en sus ciclo de vida (ISO, 2018). Se basa en 5 principios: Relevancia, exhaustividad, consistencia, precisión y transparencia (tabla 2).

Relevancia	Exhaustividad	Consistencia	Precisión	Transparencia
Fuentes de datos y métodos apropiados.	Incluir todas las emisiones de GEI durante el ciclo de vida del producto.	Permitir una comparación significativa en la información relacionada con GEI.	Reducir el sesgo y la incertidumbre tanto como sea práctico.	Divulgar suficiente información para permitir que terceros tomen decisiones.

Tabla 2. Principios en los que se basa PAS 2050 (BSI, 2008b).

Además, permite certificación y *labeling* de productos evaluados, provee una guía mínima para comunicación de resultados a clientes (Liu et al., 2016) y recomienda uso y desarrollo de reglas suplementarias y PCR's (reglas de categoría del producto, por sus siglas en inglés) (Welsh, García, & Ochoa, 2016). Una vez que se elige el producto, el siguiente paso es especificar la unidad funcional que refleja la forma en que el usuario final consume realmente el producto.

PAS 2050 adopta un enfoque para evaluar las emisiones de GEI asociadas con bienes o servicios, que permite a las empresas identificar formas de minimizar las emisiones en todo el sistema del producto (ISO, 2018).

Esta metodología hace uso de dos tipos de datos principalmente:

- Datos primarios: Son aquellas mediciones directas realizadas internamente en la cadena de suministro sobre el ciclo de vida del producto a evaluar.
- Datos secundarios: Son aquellas mediciones externas que no son específicas del producto, sino más bien representar una medición promedio o general de procesos o materiales similares (PAS 2050, 2018).

Esta metodología se aborda con mayor detalle posteriormente.

1.2 ANTECEDENTES

Los efectos globales ocasionados por el calentamiento global han ocasionado que la evaluación de los GEI en la generación y uso de energía sea de gran importancia, ya que, como se ha mencionado, es uno de los principales sectores que contribuyen a su emisión. México es un país altamente vulnerable ante los efectos del cambio climático (SRE, 2016). El impacto negativo del cambio climático se puede incrementar en condiciones sociales desfavorables como la pobreza y la degradación ambiental, lo que genera altos niveles de vulnerabilidad en muchas regiones del país. En el 2013 (INEGI), las emisiones directas de GEI en el país ascendieron a 665 Mt de CO₂ equivalente, de las cuales la mayor contribución se debe al sector transporte (26%), seguido por la generación de energía eléctrica (19%) y el de industria (17%) (INECC, 2015).

En México se ha establecido un marco ambiental regulatorio en el tema de cambio climático que comprende la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y los instrumentos que de ella se derivan. También se han establecido acciones de política para el uso de energías renovables con la finalidad de mitigar emisiones de GEI como es la Ley de Transición Energética y la Estrategia Nacional de Energía 2012-2026 (Gobierno de la república, 2016).

En este contexto, el uso de biocombustibles como fuente de energía renovable puede presentar importantes ventajas para el país, pero es necesario que cualquier proyecto de biocombustibles cumpla con criterios de sustentabilidad lo que incluye una minimización de emisiones de GEI que se producen durante su cadena de producción. Por estas razones es necesario una reducción de las emisiones de GEI considerando que cada unidad de emisión tiene un impacto que necesita ser evaluada.

Cada sistema bioenergético es diferente, por lo tanto, sus emisiones de GEI deben verificarse independientemente y mostrar de forma clara y transparente que los resultados que en cada uno existen una mitigación real de GEI. La HC se ha utilizado como un indicador en países que buscan lograr metas propias de reducción de emisiones de GEI.

Es así como se han desarrollado, al margen de los mecanismos y metodologías creados por compromisos internacionales, procesos voluntarios de mitigación de GEI, en este contexto, se han desarrollado múltiples estándares y marcos metodológicos, sin embargo, no existen un marco metodológico común y uniforme de medición de emisiones de GEI en forma voluntaria que se adapten a proyectos específicos y responden a criterios y procesos de aprobación propios de estas estructuras internacionales (CEPAL, 2011).

Es fundamental una revisión crítica sobre los alcances de la HC, sus bases científicas, áreas de oportunidad, así como la posición actual del país en materia de bioenergía y a partir de esto, generar una metodología específica para las condiciones de México. Esta metodología debiera permitir la armonización y transparencia en los cálculos de GEI, para poder evaluar su conveniencia como una herramienta de información para la formulación de políticas públicas que permitan la inclusión de tecnologías bajas en carbono en el sistema energético mexicano.

Este proyecto pretende generar y utilizar una metodología para calcular la HC aplicada a la producción de biocombustibles gaseosos en México, al mismo tiempo que contribuye a detectar puntos críticos en la cadena de producción (en términos de emisiones de GEI), posibles acciones de mejora. Además, se analizarán los alcances de la HC para informar la formulación de políticas de mitigación de GEI, tal como se ha observado en políticas implementadas en otros países. Tal es el caso del estándar RFS2 en EUA, RTFO de Reino Unido o el de la Red de la Unión Europea, que además de presentar su propia metodología para el cálculo de la Huella de Carbono, establecen metas de mitigación de GEI, mecanismos de compensación y su propio software para facilitar el cálculo de la HC de cada cadena de generación de biocombustibles, asegurando así la sustentabilidad y mitigación de los mismos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Existe una gran controversia sobre los verdaderos beneficios de los biocombustibles respecto a la mitigación de GEI. Estos resultados, además, cambian dependiendo de la metodología empleada para el cálculo de la huella de carbono, de manera que es importante analizar las principales diferencias metodológicas y cómo afectan los resultados. En la bibliografía se encontraron algunos estudios de caso, en los cuales podemos observar la diferencia de mitigación que se obtiene de la misma cadena de generación de biocombustible al utilizar metodologías distintas:

En 2006, Farrell, A. E. realizó una comparación entre seis estudios de la HC en la producción de biocombustible líquidos para el caso de maíz. Dos de los estudios fueron descartados ya que se destacan valores de energía neta negativos e implican emisiones relativamente altas de GEI al suponer que los coproductos de etanol no deben tener asignadas emisiones. Los 4 estudios restantes muestran diferencias significativas pero ambiguas en cuanto al impacto de un cambio de gasolina a etanol sobre las emisiones de GEI, con los valores informados que van desde -20% hasta 32% de mitigación. Dichas diferencias se deben principalmente a la asignación de emisiones que cada metodología considera (Farrell, 2006).

En 2011 Whittaker et al. evaluaron tres metodologías: RTFO, RED y PAS 2050 que evaluaban la producción de bioetanol a partir de grano de trigo y paja de trigo. Como resultado obtuvieron resultados distintos de las emisiones de GEI, a consecuencia de los diferentes enfoques del ACV que tiene cada una de las metodologías (Atribucional o consecuente). Aunado a esto, las metodologías no presentan definiciones cuidadosas de datos importante como son: coproductos, subproductos y desechos, por lo que el lector podría interpretarlo de distintas maneras. Además, no son consistentes en los cálculos demostrados, ni transparentes las cifras predeterminadas para el cálculo de emisiones. Al tener resultados distintos, dificulta la toma de decisiones y la creación de políticas (Whittaker, McManus, & Hammond, 2011).

En 2013, Whittaker et al, compararon entre 11 herramientas existentes de contabilidad de GEI de cultivos herbáceos, ya sea para la producción de alimentos o bioenergía en el Reino Unido. Los resultados mostraron grandes diferencias, principalmente debido a cómo las emisiones de GEI son contabilizadas para la fabricación y uso de fertilizantes, meta establecida, el alcance de la evaluación y los datos del factor de emisión utilizado.

En 2013, Hennecke, et al., llevaron a cabo una investigación comparando dos herramientas de cálculo: la "herramienta BioGrace" y la "herramienta de GEI Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB)" para cálculos de GEI bajo el Directiva de Energías Renovables (ambas están disponibles gratuitamente) con la finalidad

de evaluar la HC de 4 cadenas de producción: etanol a partir de trigo, etanol a partir de caña de azúcar, biodiésel a partir de colza y biodiesel de aceite de palma. Ambas herramientas siguen la metodología de la RED y se utilizaron exactamente los mismos datos de entrada a lo largo de la cadena de producción. A pesar de esto, los resultados fueron significativamente diferentes. Lo que significa que el utilizar una herramienta u otra puede mejorar el rendimiento de GEI de un biocombustible en un 20-35% sin mejorar el proceso de producción (Hennecke, et al., 2013). Las principales diferencias en los resultados se deben principalmente al uso de diferentes valores estándar en las dos herramientas, particularmente en la etapa de producción de N-fertilizantes y la aplicación de químicos en la etapa de cultivo, así como los valores utilizados para las emisiones provenientes de la electricidad. Por último, otro aspecto que afecta la variación de los resultados es respecto a las ecuaciones utilizadas para el cambio en el uso de la tierra.

Al existir varias metodologías y adecuaciones de las mismas que pueden ser implementadas para el cálculo de la HC en tecnologías energéticas, es indispensable considerar: 1) Cada sistema bioenergético es diferente y sus balanzas de GEI deben verificarse independientemente, 2) Debiera ser posible demostrar de forma clara y transparente que existe una mitigación real de GEI. Debido a esto han existido iniciativas gubernamentales que tiene como finalidad no sólo lograr resultados transparentes al momento de comunicar resultados, sino además adecuar estas metodologías al país donde se evalúa la HC del ciclo de vida de los biocombustibles.

1.4 HIPÓTESIS

Mediante la generación y aplicación de una metodología para el cálculo de la Huella de Carbono de biocombustibles gaseosos, es posible generar lineamientos de política pública para la inserción de tecnologías de bioenergía con emisiones bajas de carbono en el sistema energético mexicano.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y aplicar una metodología de cálculo de la Huella de Carbono de biocombustibles gaseosos para determinar su aporte en la formulación de lineamientos de políticas públicas para la mitigación de GEI de biogás en el contexto mexicano.

1. Proponer una metodología para el cálculo de la HC que sea pertinente para las condiciones de México.
2. Evaluar la HC para 3 estudios de caso empleando la metodología e identificar los aspectos y variables clave que impactan los resultados de HC y su mitigación de GEI con respecto a uso de combustibles fósiles.
3. Evaluar la información que arroja la metodología y el modelo para determinar si permite generar información útil para la formulación de lineamientos de política pública.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología que se siguió para el cumplimiento de los objetivos se desarrolla a continuación (figura 3):

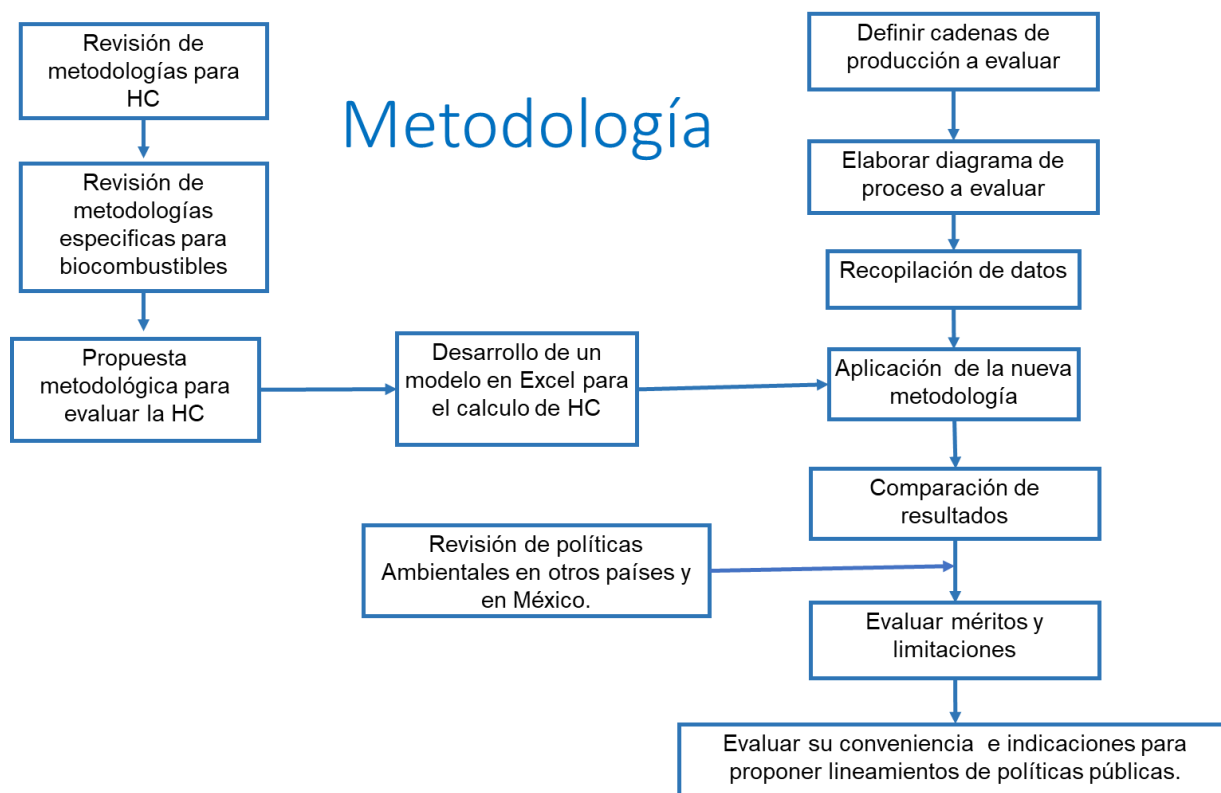


Figura 3. Metodología.

Revisión de metodologías para HC.

2.1.1 PAS 2050

PAS 2050 es una especificación públicamente disponible para evaluar las emisiones de GEI del ciclo de vida de los productos, preparada por BSI British Standards y copatrocinada por Carbon Trust y el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido. Su principal objetivo es responder a la necesidad de tener un método consistente que permita la evaluación de los GEI emitidos durante el ciclo de vida de un producto, desde la extracción de la materia prima hasta su disposición final. Se basa en la evaluación del ciclo de vida con métodos establecidos a través de la ISO BS EN ISO 14021 (Etiquetas y

declaraciones medioambientales), BS EN ISO 14044: 2006, (Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida: requisitos y directrices IPCC 2006) e ISO14044. Esta metodología consta de 5 etapas (figura 4):

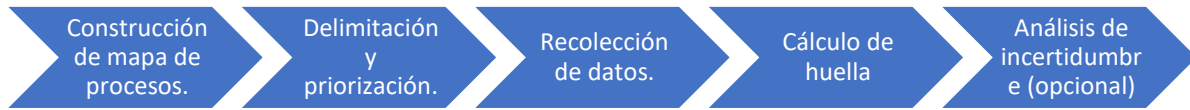


Figura 4. Metodología PAS 2050. Pas 2050, 2008

- 1) **Construcción del mapa de procesos:** La primera etapa consiste en identificar cada una de las etapas del proceso a evaluar, las materias primas, actividades y procesos que se llevan a cabo.
- 2) **Delimitación y priorización:** Esta etapa consiste en definir los límites y el alcance del sistema, considerando:
 - a) Establecer límites del sistema, determinando las etapas de ciclo de vida, así como las entradas y salidas relevantes para el análisis. Estos límites deben ser consistentes con una Regla de Categoría de Producto (PCR), que son un conjunto de reglas específicas, requisitos y directrices para desarrollar declaraciones ambientales para uno o más grupos de productos que ofrecen un enfoque consistente y aceptado internacionalmente para definir el ciclo de vida de un producto, siempre y cuando esté disponible.
 - b) Informar parcialmente las de emisiones GEI: Aviso de cuantificaciones y estimaciones previas.
 - c) Contribuciones y umbrales: Estimación del aporte de cada etapa del proceso al total de emisiones GEI cuantificables.
 - d) Exclusiones a los límites del sistema: Aquellas etapas que no son consideradas dentro del proceso, justificando su exclusión.
- 3) **Recolección de datos:** Para esta etapa se necesitan dos tipos de datos: los datos de actividad y los factores de emisión; se deben incluir todas las entradas y salidas del sistema:
 - a) Registro de todos los datos de importancia para emisiones de GEI en ciclo de vida del producto.
 - b) Reglas de calidad de los datos.
 - c) Enumeración separada de datos primarios y secundarios.
 - d) Asignación de emisiones: División de cargas ambientales entre productos, sub-productos y residuos.
- 4) **Cálculo de huella de carbono:** Esta última etapa es fundamental ya que consiste en realizar los balances de masa del sistema, la cual incluye:

- a) Conversión de datos primarios y secundarios en emisiones GEI utilizando factores de emisión para su conversión a unidades de CO₂eq.
 - b) Cálculo de carbono almacenado ya que contiene especificaciones para estos casos.
 - c) Expresión de resultados por unidad funcional: Cuantificación de emisiones GEI por unidad descriptiva del producto entregado por sistema analizado.
 - d) Contabilización de contribuciones menores excluidas: Consistencia con etapas y procesos excluidos anteriormente.
- 5) **Análisis de incertidumbre:** Esta es una etapa opcional y consiste en la estimación de incertidumbre en los datos utilizados (García Bustamante & Cerutti Maser, 2016).

Consideraciones

PAS 2050 presenta ciertas consideraciones que son importantes evaluar para su correcta implementación:

- Excluye bienes capitales, energía humana y animal invertida en procesos, así como el transporte del consumidor y conmutación de los trabajadores del sistema (Sinden, 2009).
- Los productos pueden reclamar un beneficio de almacenamiento en las siguientes situaciones (Carbon Trust and Defra, 2008; The British Standards Institution, 2011):
 - El producto no es un alimento (para humanos o para animales).
 - Más del 50% de los restos de masa del componente vegetal se eliminan de la atmósfera un año o más después de la producción.
 - El material que contiene el carbono a base de plantas fue especialmente creado o reciclado / reutilizado para ingresar a este producto y, por lo tanto, el beneficio de almacenamiento es adicional a lo que habría ocurrido sin la creación del producto.
- Para el cálculo del almacenamiento de carbono es importante comprender qué cantidad de carbono en el producto se libera como CO₂ durante los 100 años posteriores a su generación y cuándo será liberado (Carbon Trust and Defra, 2008).
- La asignación de emisiones puede realizarse de la siguiente forma y en el siguiente orden:
 - División del sistema en subsistemas o expansión del sistema (cargas evitadas por reemplazo).
 - De acuerdo a lo dictado por requerimientos suplementarios o PCRs.
 - Con base en valor económico.

(BSI, 2008a).

- Si durante el proceso de producción, tierra no agrícola se transformó a tierra agrícola, a partir del 1 de enero de 1990, entonces las emisiones de GEI asociadas con el cambio de uso del suelo directo deben incluirse en el cálculo de la huella de carbono ya que se supone que las emisiones totales de GEI derivadas del cambio en el uso de la tierra se liberarán en cantidades anuales iguales durante 20 años. Para su cálculo se debe identificar el país donde el cambio de uso de la tierra tomó lugar y con los datos establecidos en la metodología se busca el factor de emisión apropiado. Estas emisiones no son incluidas para el caso de sistemas agrícolas preexistentes (Carbon Trust and Defra, 2008; The British Standards Institution, 2011).
- No incluye bonos ni créditos de carbono (BSI, 2008^a).
- No se incluyen las emisiones por cambio de uso de suelo indirecto (CUSI) (ISO, 2018).
- La cuantificación de emisiones de GEI durante la disposición final del producto deben ser reportadas por separado, ya que se encuentran fuera del alcance de PAS 2050 (Carbon Trust and Defra, 2008).
- Para que el proceso o producto validado por PAS 2050 tenga validez, no deben existir modificaciones dentro del proceso de generación que fue evaluado (BSI, 2008a).
- Su evaluación y certificación requieren de una revisión de terceros, pudiendo ser realizada por: organismos certificados, terceros no certificados y autoverificación basada en la BS EN ISO 14021 (Carbon Trust and Defra, 2008)
- Si durante el proceso se utiliza energía renovable se requiere de pruebas de que el proceso en cuestión hizo uso de esta energía y garantía de que el uso de esa energía renovable no influencia al factor de emisión de cualquier otro proceso (García Bustamante & Cerutti Masera, 2016; Weidema, Hermansen, Kristensen, & Halberg, 2008)

2.1.2 GHG Protocol

El GHG Protocol se creó en 1998, su principal objetivo es desarrollar normas y herramientas de contabilidad e informes de gases de efecto invernadero (GEI) internacionalmente aceptados para promover una economía baja en emisiones de carbono. El Protocolo proporciona requisitos y orientación para que los usuarios cuantifiquen públicamente su inventario de emisiones y remociones de GEI asociadas al ciclo de vida de un producto y en base a esto puedan tomar decisiones informadas. Contabiliza 6 GEI: Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido

Nitroso (N₂O), Hexafluoruro de Azufre (SF₆), Perfluorocarbonos (PFC), Hidrofluorocarbonos (HFC).

Este estándar menciona además que en caso de adicionarse algún otro GEI deberá ser reportado claramente en el inventario, así como justificar su inclusión. Incorpora un apartado sobre asignación de emisiones a coproductos en la cual se estipula que deberá evitarse la asignación mediante el uso de la subdivisión del proceso, redefinir la unidad funcional o expandir el sistema. Si la asignación es inevitable, las compañías asignarán emisiones y remociones de GEI basadas en las relaciones físicas subyacentes entre el producto de interés y los coproductos. De no ser posible se deberá seleccionar ya sea la asignación económica u otro método de asignación que refleje la relación entre el producto y los coproductos.

Propuesta metodológica.

A partir de la comparación de las metodologías anteriores para el cálculo de la HC, se propondrá una metodología particular que se adapte a las condiciones de México. Esta nueva metodología se aplicará a tres estudios de caso para tecnologías de bioenergía, con la finalidad de evaluar sus ventajas y limitaciones. Posteriormente se podrán generar información sobre su pertinencia o condiciones para poder ser considerada como una herramienta para ayudar a la elaboración de políticas públicas.

A partir de la comparación de las metodologías PAS25050 y GHG Protocol se generó una tabla comparativa para facilitar encontrar las principales similitudes y diferencias entre ambas (Tabla 3).

	PAS2050	GHG Protocol
Tipo de Análisis	<i>Bottom-up</i> /Análisis de procesos	<i>Bottom-up</i> /Análisis de procesos
Enfoque ACV	Atribucional	Atribucional
Límites de Sistema	<i>De la cuna a la tumba, de la cuna a la puerta</i>	De la cuna a la tumba, de la cuna a la puerta
Perfeccionamiento Límites de Sistema	No disponible	No disponible
Elección Unidad Funcional	Preferencia por PCR	Consistente con objetivo y alcance
Reglas de <i>cut-off</i>	1% de total de emisiones al	Consistente con objetivo y

	completar el 95%	alcance
Asignación	1) División en subprocesos 2) Expansión del sistema 3) Criterio económico	1) División en subprocesos o expansión del sistema 2) Criterios físicos 3) Criterio económico
Emisiones Bienes Capitales	Excluidas	Incluidas
Fases de Uso y Fin Vida Útil	Omitidas si <i>cradle to gate</i> es límite del sistema; perfiles de uso	Omitidas si <i>cradle to gate</i> es límite del sistema
Cambio Uso Suelo	Procedimiento específico y factores de emisión nacionales; excluye CUSI	Guía para determinación de impactos
Almacén de Carbono	Incluido; provee método para cálculo	Reportada de manera separada
Emisiones Retrasadas	Incluido; provee método para cálculo	No incluidas
Comunicación Resultados	Requerimientos externos	Reporte requerido; especificaciones en norma
Herramienta computacional	No	No

Tabla 3. Comparación entre PAS2050, ISO 14067 y GHG Protocol (Elaborado por García et al., 2017 con datos tomados de Inaba et al, 2016; Wu et al, 2015).

Una vez comparados los méritos y limitaciones de ambas metodologías se decidió que la metodología PAS2050 sería la base para la propuesta metodología para el cálculo de la HC de biocombustibles gaseoso en México debido a que presenta mayor robustez y permite transparencia en el cálculo de resultados. Además, esta metodología presenta ciertas ventajas que deben tomarse en cuenta durante su utilización, por ejemplo:

- Es un Estándar diseñado de manera profesional y con fin de unificar metodologías de huella de carbono (Liu *et al*, 2016).
- A pesar de que es intensivo en recursos económicos y en tiempo de elaboración (Barnett *et al*, 2012), su concepto es de naturaleza fácilmente transmisible y comercialmente atractiva (Weidema *et al*, 2008).

- Presenta un enfoque *cradle-to-gate* (enfoque en cadena productiva) como de manera *cradle-to-grave* (enfoque en consumidores) (EC, 2010).
- Se asocia a la metodología PAS2060, la cual es una especificación que amplía a PAS2050 con el fin de realizar un cálculo consecuente a la implementación de acciones reductoras de HC con el fin de obtener una certificación *carbon neutral* (CEPAL, 2010).
- Promueve un mayor esfuerzo en la recolección de datos que la ISO 14044 (Dias & Arroja, 2012).
- Tiene presencia internacional: usado para etiquetado de productos en Francia, Alemania, Australia y Corea del Sur (Liu *et al*, 2016).
- Una de sus características principales que podría ser considerada como una ventaja y desventaja a la vez, es que permite una mayor especificidad de resultados ya que requiere de divulgación de información relativa a procesos por parte de productores y proveedores, sin embargo, puede ser información confidencial (Barnett *et al*, 2012).

Se realizaron adecuaciones a la metodología descrita por la PAS2050, principalmente en los aspectos que se describen a continuación:

1. **Se incluyen las emisiones por el cambio directo en el de Uso de Suelo (CUSD):** Se ha encontrado que las emisiones en la etapa agrícola, asociadas al CUSD pueden ser predominantes en la HC de sistemas, por lo tanto, se debe enfatizar la obtención de datos representativos y confiables para este apartado, así como transparencia en los cálculos realizados. Con la finalidad de alcanzar dicho objetivo en la metodología propuesta se incluyen ecuaciones que permiten su cálculo.
2. **Cambio en el contenido de carbono en el suelo:** En el caso de que no se presente cambio de uso de suelo, pero exista un cambio en el cultivo existente con el objetivo de obtener materia prima para la generación de biocombustible, es necesario determinar el cambio de carbono almacenado, por lo que en el desarrollo de la metodología se facilita una serie de ecuación para su cálculo.
3. **Cambio en el contenido de carbono en la biomasa:** En la metodología se presenta una serie de ecuaciones alométricas que pueden ser utilizadas para estimar el cambio en el carbono almacenado en la biomasa aérea.
4. **Enfatizar recaudación de datos para insumos a utilizar:** Se debe recabar la mayor cantidad de datos primarios específicos para el sitio.

5. **Asignación de emisiones:** Uno de los parámetros más importantes en el desarrollo del análisis de HC desde el punto de vista del ciclo de vida es la obtención de un inventario representativo que sea reproducible, lo implica una buena calidad de datos, además de una correcta asignación de los mismos a cada uno de los subsistemas que componen el ciclo de vida del producto. La metodología de la HC permite delimitar el ciclo de vida del producto o proceso y cuantificar la entrada de materias primas, la generación de residuos y las emisiones asociadas al proceso. En el caso de procesos cuyo resultado final sea un solo producto o proceso, la asignación es sencilla, ya que todas las emisiones son atribuidas a dicho producto. Sin embargo, en sistemas en los cuales se obtiene más de un producto es necesario asignar o repartir las cargas ambientales a cada uno de los productos de manera equitativa.

En la metodología que es propuesta en esta investigación, uno de los principales cambios fue, precisamente, en la parte de los criterios de asignación de las emisiones ya que la metodología PAS2050 establece como método prioritario: la “división de los procesos unitarios para ser asignados en dos o más subprocesos” (PAS 2050); como segundo método propone: “la expansión del sistema de productos para incluir funciones adicionales relacionadas con los coproductos”. En cambio, en el nuevo método se propone la asignación por contenido energético, la cual se basa en dividir las emisiones entre el producto y los coproductos de acuerdo al poder calorífico inferior y la masa de cada uno de ellos, lo que por consiguiente lleva a asignar más emisiones a aquel producto cuyo contenido energético sea mayor.

Además, se añade la utilización de créditos al sistema con fines comparativos y se incluyeron las emisiones del uso y/o conversión a electricidad.

La metodología completa propuesta en esta investigación se presenta en el Anexo 1.

2.3 Selección de las cadenas a evaluar.

Fueron seleccionadas 3 cadenas de generación de biogás con la finalidad de utilizar el nuevo método propuesto. Para cada caso se evalúa como uso final la generación de calor y la generación de electricidad y se incluye el inventario de dicho sistema. Es importante mencionar que estas cadenas fueron seleccionadas debido a que se tuvo acceso a las plantas para recolectar la mayor cantidad de datos primarios posibles. Las cadenas seleccionadas son:

- Generación de biogás a partir de aguas de tratamiento de aguas residuales

- Generación de biogás a partir de FORSU (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos) + lodos.
- Generación de biogás a partir de cultivo energético + excretas.

Se evalúan 3 usos finales: generación de calor, generación de electricidad y uso en el transporte. Además, se presentan los resultados utilizando 1) asignación energética y créditos.

2.3.1 Cadena 1. Biogás a partir de aguas de tratamiento de agua residual.

La primera cadena de generación de biogás corresponde a una planta de Tratamiento de Aguas residuales ubicada en Morelia, Michoacán, cuyas aguas provienen de comercios aledaños a la planta, principalmente restaurantes. A continuación, su descripción:

1. Descripción de la cadena de generación:

- La primera etapa consiste en la entrada de 5040 L de agua residual al día de dentro de las instalaciones de la planta de aguas residuales con un Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 35.28 kg/día.
- A continuación, el agua pasa a través de una trampa de grasas, mediante la cual las grasas son removidas del agua y después se regresan al comercio generador.
- En seguida, el agua, pasa a través de una rejilla para remover objetos grandes del agua, como pañales, toallas sanitarias, algodón, toallas húmedas, botellas rotas o cualquier otro tipo de basura que llega al agua y que puede dañar el resto del equipo de tratamiento si no se elimina. Los desechos sólidos son removidos del agua y después se manejan en los basureros.
- El siguiente paso es a través de un desarenador, que forma parte de la segunda fase del pretratamiento, consistente en un proceso continuo de extracción del agua bruta de los sólidos en suspensión fácilmente decantables, como grava, arena y partículas minerales.
- A continuación, el agua se dirige hacia un biorreactor Anaerobio de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB), utilizando una bomba de 1 hp para dirigirla hacia el digestor. Las aguas residuales entran en el reactor por el fondo, y fluyen hacia arriba. Una capa de lodo suspendida filtra las aguas residuales, en esta capa de lodo se encuentran microorganismos que degradan los compuestos orgánicos. Como resultado se liberan gases, metano y bióxido de carbono, es decir, biogás. Las burbujas ascendentes mezclan los lodos (Von, 2005) (figura 7 y 8).

- Después el agua tratada es dirigida hacia un tanque elevado donde es almacenada y utilizada para abastecer la planta tratadora de agua. En esta etapa se utiliza una bomba de 0.5 hp.
- Por último, los lodos son dirigidos hacia un aljibe donde son almacenados hasta su disposición final.
- Es importante mencionar que dentro de esta planta de tratamiento de agua residual cuenta con paneles solares para abastecer un porcentaje de la energía requerida para el proceso (figura 9).

Se realizaron 2 diagramas de flujo con la finalidad de observar el panorama completo de la generación de biogás, uno para uso final como generación de calor (figura 5) y otro para generación de electricidad (figura 5).

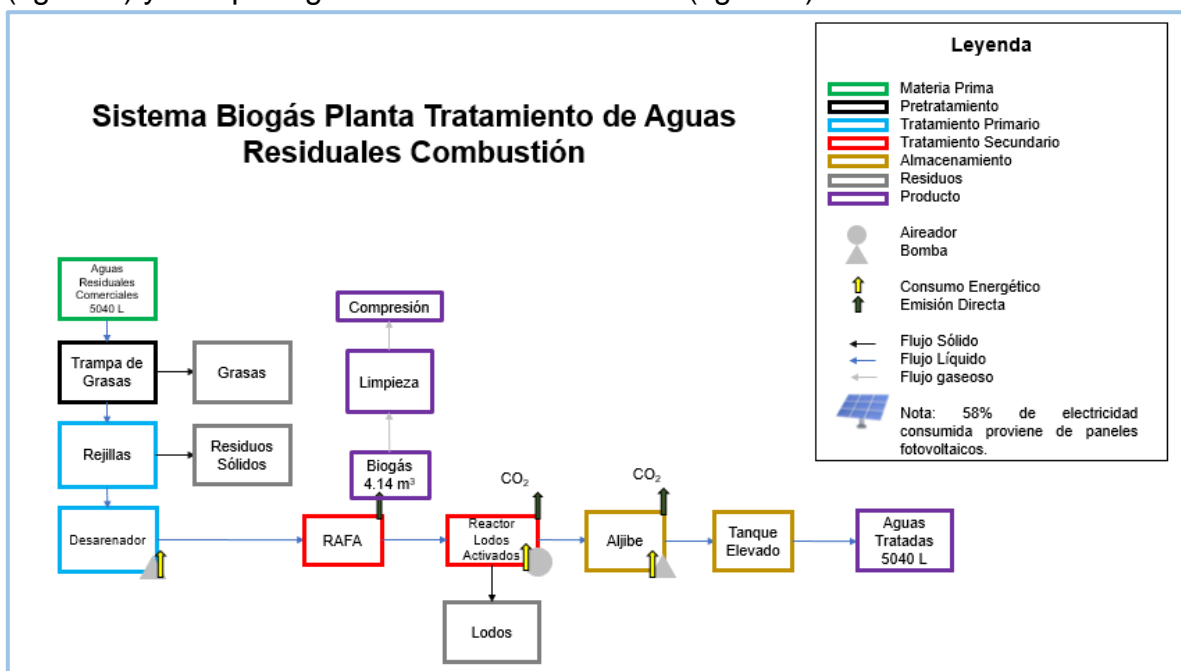


Figura 5. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de aguas residuales utilizando como uso final la G. de calor. Elaboración propia.

Uso final para generación eléctrica:

- Generación eléctrica con una eficiencia del 29%.
- Obtención de 25.8 MJ de energía eléctrica.

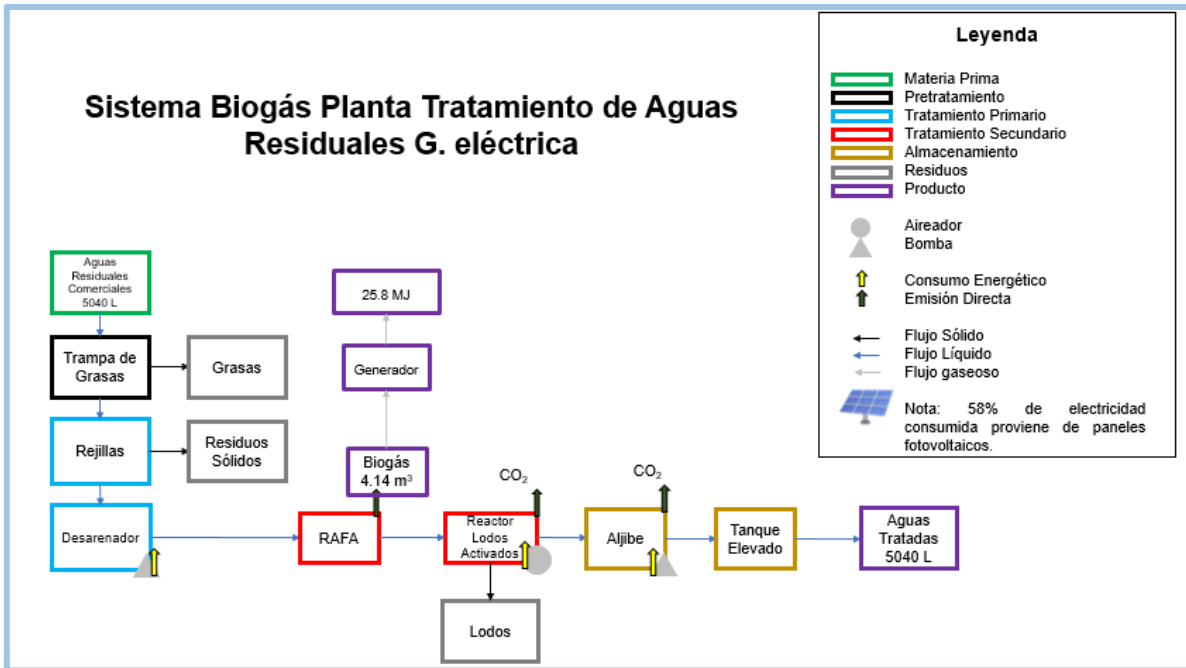


Figura 6. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de aguas residuales utilizando como uso final la generación eléctrica. Elaboración propia.



Figura 7. Biorreactores



Figura 8. Biorreactores



Figura 9. Paneles solares.

Unidad funcional: 1 litro de agua tratada

2.3.2 Cadena 2. Biogás a partir la Fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

La Fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) es aquella “generada en casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizados en actividades domésticas, de los productos consumidos, así como de los envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos” (CDHCU, 2016).

Descripción de la ruta tecnológica:

- La primera etapa consiste en la recolección de 1 tonelada de FORSU, con un contenido del 16% de Sólidos Volátiles (SV).
- A continuación, el FORSU es transportado una distancia de 9.3 km hasta la planta de generación. Este dato es un supuesto, ya que se considera que la planta estaría ubicada en la ciudad de Morelia.
- Posteriormente se lleva a cabo una molienda de FORSU, utilizando un molino de 9.32 kWh.
- Una vez disminuido el tamaño de partícula, el FORSU molido, es transportado hacia el RHALE (reactor tipo reactor hidrolítico-acidogénico) a través de un molino de martillo, donde se lleva a cabo una Digestión anaerobia.
- A continuación, el efluente es dirigido hacia una Digestión anaerobia en un reactor UASB (Reactor de lodo anaeróbico de flujo ascendente) del lixiviado proveniente de RHALE con su consecuente generación de biogás y aguas residuales.
- De este proceso se obtienen 73.51 m³ de biogás.

Uso final:

Generación de calor:

- Soplador 3.9 Hp.
- Obtención de 698 MJ de energía.

Sistema Biogás FORSU-Agua Residual Generación térmica

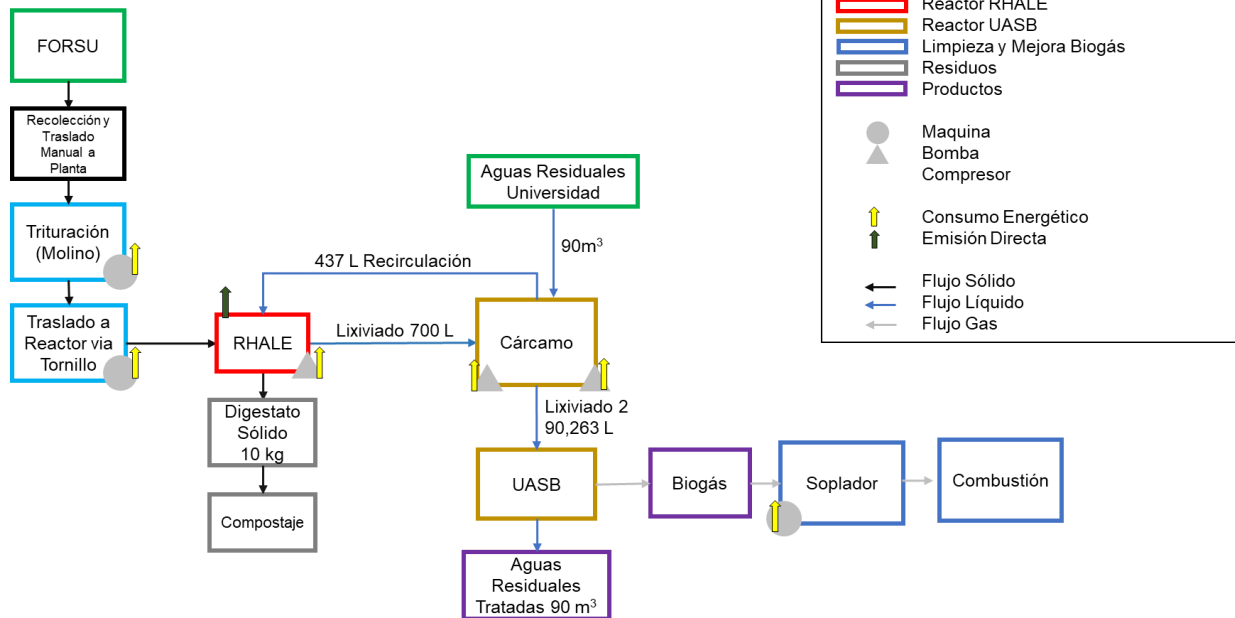


Figura 10. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de FORSU, utilizando como uso final la generación de calor. Elaboración propia.

Uso final: generación eléctrica.

- Generación eléctrica con una eficiencia del 36%.
- Obtención de 632 MJ de energía eléctrica.

Sistema Biogás FORSU-Agua Residual Universidad. Generación Eléctrica.

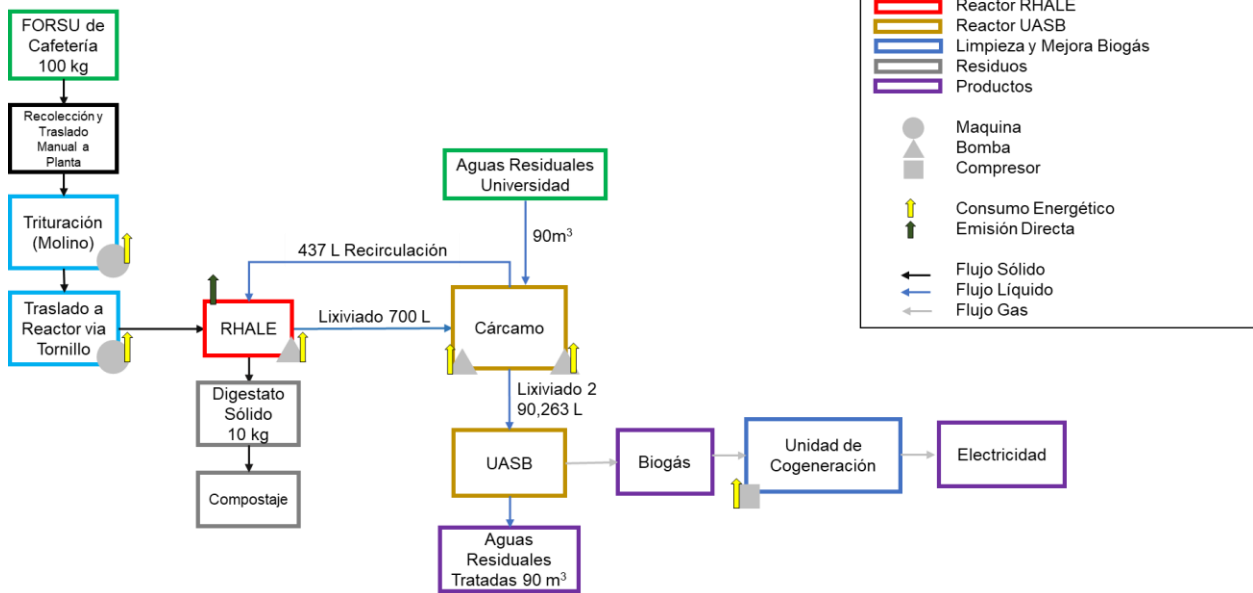


Figura 11. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de FORSU, utilizando como uso final la generación eléctrica. Elaboración propia.

En esta cadena también se evaluó un uso final como combustible de vehículo razón por la cual se incluye una etapa de compresión.

Uso final: transporte

- Limpieza del biogás.
- Compresión a 5 atm.
- Obtención de 1164 MJ de energía.

Sistema Biogás FORSU-Agua Residual Transporte

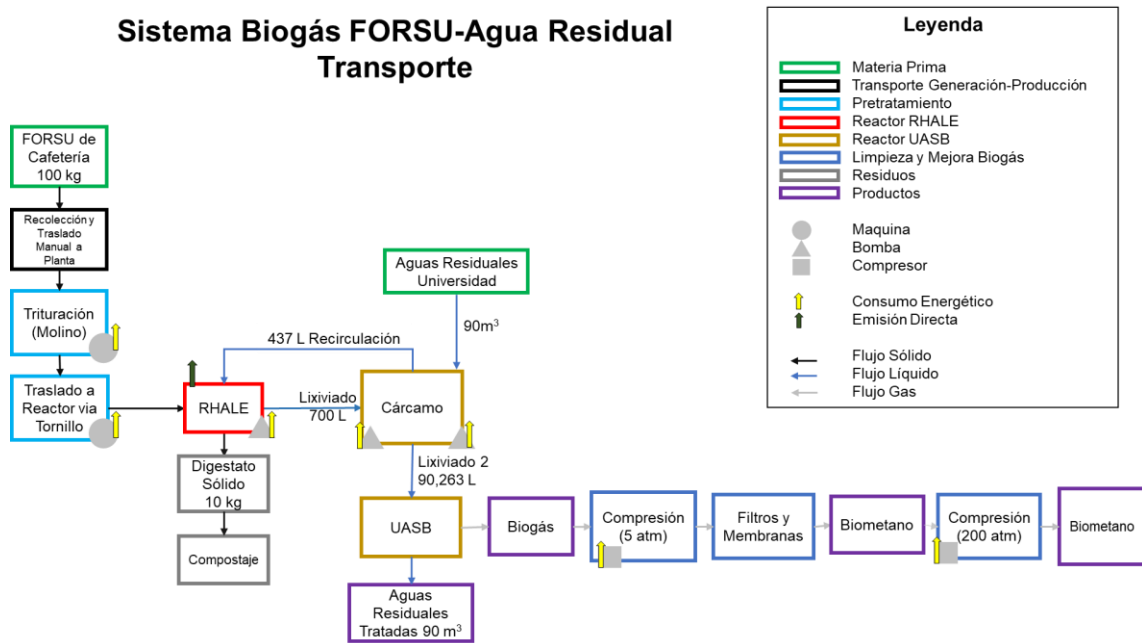


Figura 12. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de FORSU, para uso final en el transporte. Elaboración propia.



Figura 13. Molino



Figura 14. Biodigestores



Figura 15. Cárcamo

Unidad funcional: 1 MJ de energía generada a partir de residuos sólidos urbanos (FORSU).

2.3.3 Cadena 3. *Biogás a partir de un cultivo energético.*

1. Descripción de la ruta tecnológica:

- La primera etapa consiste en incluir la fase agrícola, es decir el cambio en el carbono almacenado en el suelo y en la biomasa aérea, de acuerdo al tipo de suelo, y clima de la región. Así como el cambio en el carbono almacenado en la biomasa, siguiendo las especificaciones del manual de buenas prácticas escrito por el IPCC.
- A continuación, se incluye la recolección de 6 toneladas de cultivo energético, con un contenido de SV de 60 kg, de forma manual.
- Posteriormente se transporta el cultivo energético hasta la planta de tratamiento.
- El siguiente paso es la molienda de la materia prima en un molino de 20 Hp.
- Una vez molida, la materia prima es transportada hasta el digestor utilizando una bomba de 5 hp.
- Una vez que la materia prima se encuentra en el digestor se agregan 1200 litros de agua y 2 toneladas de excremento de origen animal al día.
- Por último, se lleva a cabo la Digestión anaerobia en los Biodigestores1 y 2, consecuente generación de lodos y biogás.

Uso final para generación de calor:

- Obtención de 6545 MJ.

Sistema Biogás Cultivo Energético G. Térmica

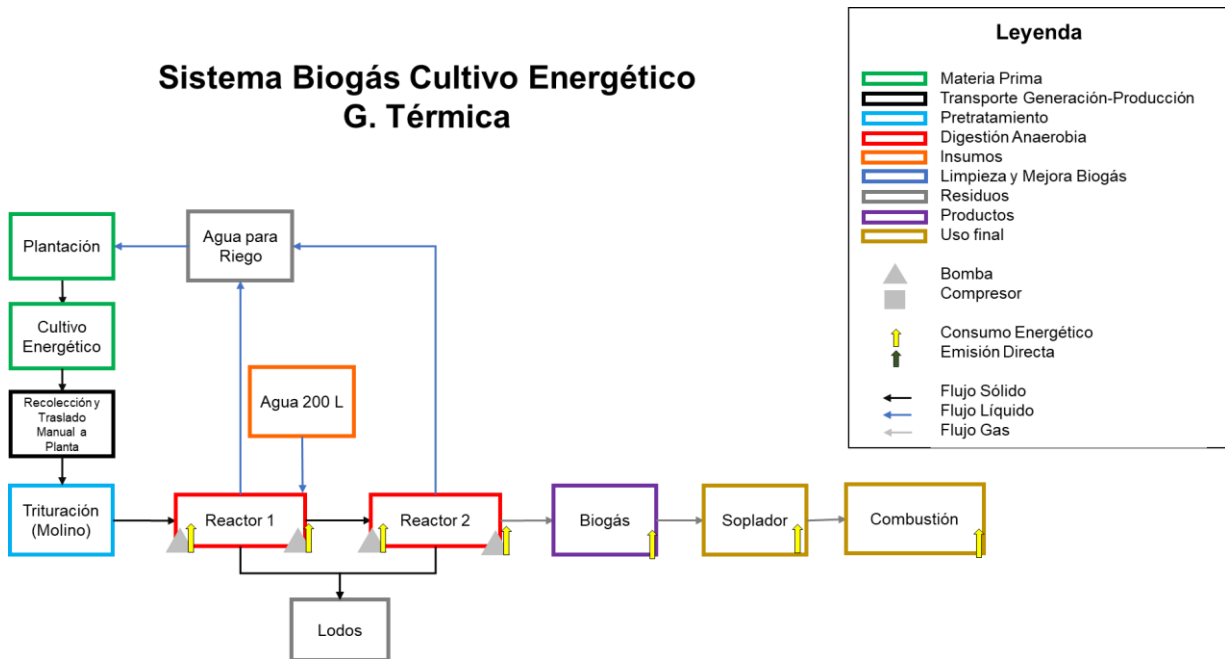


Figura 16. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de cultivo energético, utilizando como uso final la generación de calor. Elaboración propia.

Uso final para generación eléctrica:

- Generación eléctrica con una eficiencia del 32%.
- Obtención de 3220.53 MJ de energía eléctrica.

Sistema Biogás Cultivo Energético G. Eléctrica

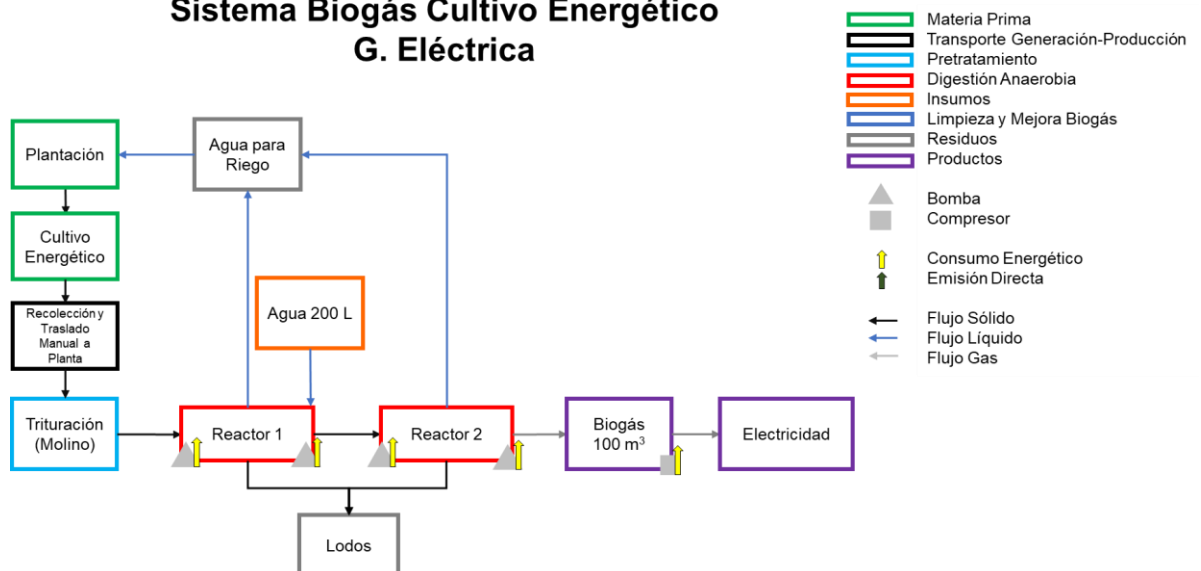


Figura 17. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de cultivo energético utilizando como uso final la generación eléctrica. Elaboración propia.

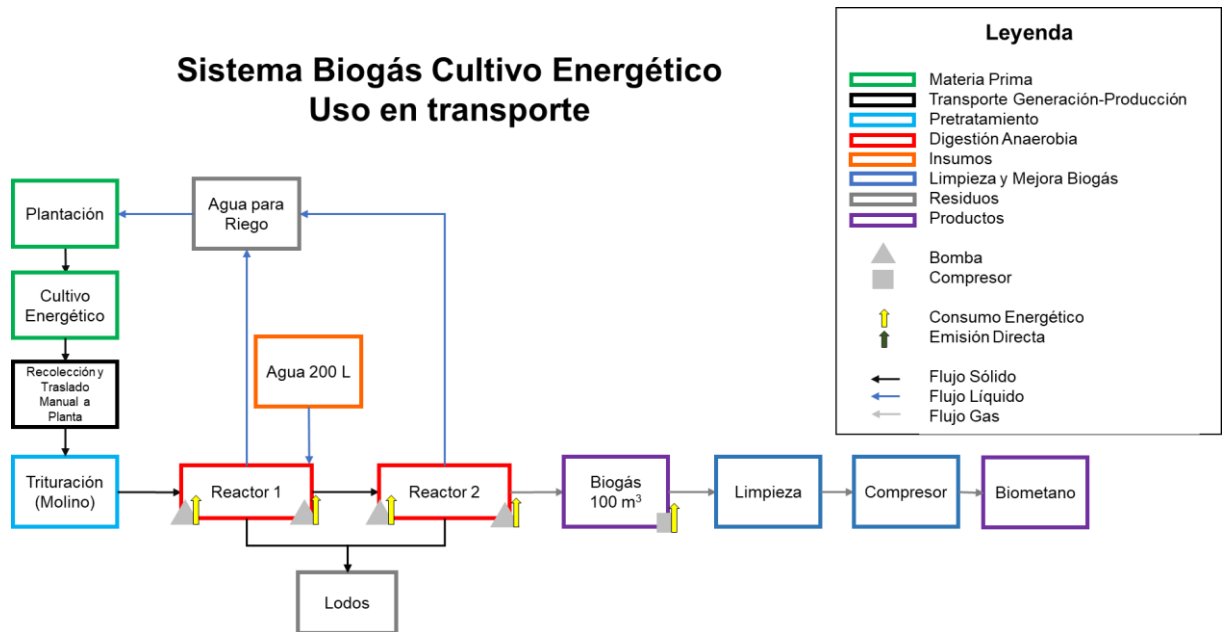


Figura 18. Diagrama del proceso de generación de biogás a partir de cultivo energético utilizando como uso final en el transporte. Elaboración propia.

Unidad funcional: 1 MJ de energía generada a partir de la digestión anaerobia de cultivo energético + excretas en una planta piloto ubicada en Michoacán.

3.RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

Una vez seleccionadas las cadenas de generación a evaluar y elaborados los diagramas de flujo se prosiguió a la recopilación de datos primarios con la finalidad de obtener el inventario de cada una de las cadenas para posteriormente realizar el cálculo de la respectiva Huella de Carbono.

Es importante mencionar que en los cálculos que se presentan a continuación parten de ciertos supuestos y consideraciones:

- El biogás será modelado a partir de un poder calorífico de 21.5 MJ/m^3 con una composición promedio de 60% CH_4 , 39% CO_2 y 1% gases traza.
- En los casos correspondientes, el biometano será modelado a partir de un poder calorífico de 35.8 MJ.

- El factor de emisión usado para la electricidad es de 165 gCO₂eq/MJ /594gCO₂eq/kWh) para la red eléctrica mexicana.
- En referencia a la digestión anaerobia, se toma que un 2% del CH₄ obtenido en la digestión se fuga del sistema comportándose como una emisión neta de CH₄(Dumont, Luning, Yildiz, & Koop, 2013)
- El transporte y recolección de FORSU a la planta de biogás fue modelado a partir de un camión de carga de 3.5 ton que realiza un traslado de 9.2 km (distancia necesaria para la recolección de 1 ton de FORSU de acuerdo a la generación diaria de residuos *per cápita* en la ciudad de Morelia, porcentaje de fracción orgánica y densidad poblacional).
- Se asume que el FORSU que es aprovechado posee un 16% de SV en peso húmedo y un rendimiento de biogás de 0.074 m³/kg FORSU húmedo.
- La unidad de cogeneración eléctrica de 160 kW modelada presenta una eficiencia eléctrica de 32%.
- Los coproductos considerados para incluirse como créditos al sistema son: sustitución de fertilizante de origen fósil y sustitución de la generación de 1 MJ de energía y/o 1 kWh de energía.

Cadena 1: Generación de biogás a partir de una Planta de Tratamiento de Aguas residuales, ubicada en la ciudad de Morelia.

Se realizó el inventario de ciclo de vida de la generación de biogás en la planta de tratamiento de agua residual, incluyendo dos usos finales: G. de calor y generación eléctrica (tabla 4).

Inventario para planta de tratamiento de aguas residuales				
		G 1		G 2
	Proceso	gCO ₂ eq/día		gCO ₂ eq/día
Etapa industrial	Pretratamiento	527		527
	Digestión anaerobia (RAFA)	749		749
	Tratamiento secundario (RHALE)	2848		2848
	Almacenamiento	40		221
	Digestato	943		843
Mejoramiento	Limpieza	1124		-
	Uso final	774		1462
	TOTAL	7005		6747

Tabla 4. Inventario de emisiones para la cadena de generación de biogás a partir de planta de tratamiento de aguas residuales. G1: Generación de calor. G2: Generación de electricidad

Al analizar detenidamente cada una de las etapas incluidas dentro de esta cadena, se puede observar que para ambos casos la etapa de tratamiento secundario, es la que tiene un mayor impacto en la Huella de carbono (figura 19). Se observa que, en esta etapa existen emisiones liberadas de CH₄ cuya contribución a la HC es muy elevada, por lo que es necesario prestar atención a estas emisiones y buscar opciones que permitan disminuirlas.

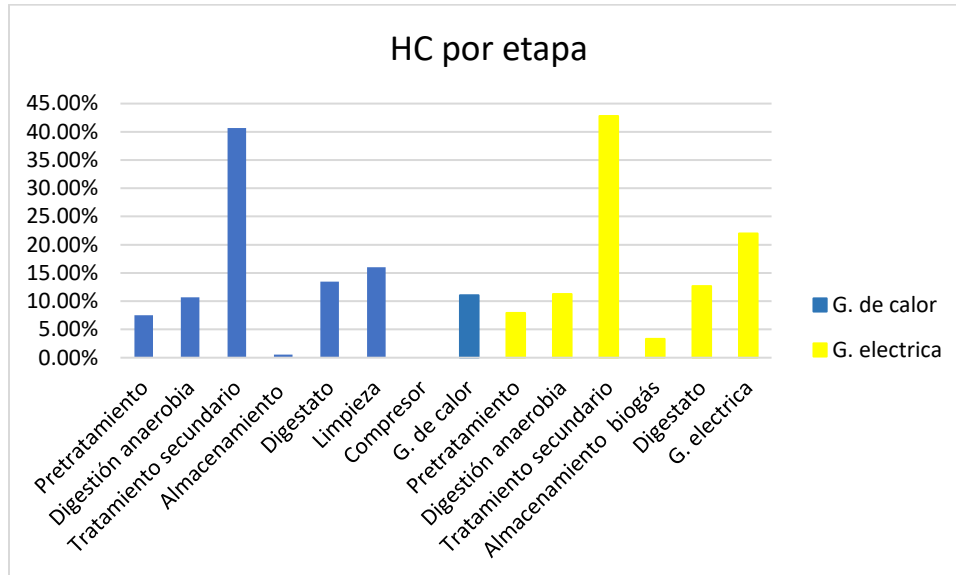


Figura 19. HC por etapa para 2 usos finales: generación de calor y generación de electricidad.

Al igual que en las cadenas anteriores, se realizó asignación energética y créditos al sistema, los resultados se muestran a continuación:

Criterio 1: Asignación energética.

La asignación energética para el sistema cuyo uso final fue la generación de calor, se realizó sobre un total de 43.41 MJ que es la energía obtenida de la combustión del producto principal, en este caso el biogás, y del coproducto, es decir los lodos. Para el sistema cuyo uso final fue la generación eléctrica, se realizó sobre un total de 7.6 kWh (tabla 5).

Asignación Energética						
	G 1			G 2		
	PC (MJ)	%	gCO _{2eq/día}	PC (MJ)	%	gCO _{2eq/día}
Biogás	43	100	5102	7.41	95	4933
Lodos (digestato)	0.04	0	5	0.38	5	253

	43		5107	7.6		6395
--	----	--	-------------	-----	--	-------------

Tabla 5. Asignación energética para uso final G. de Calor (G1) y G. Eléctrica (G2). Se presenta el Poder calorífico (PC) del producto y coproducto.

Criterio 2: Créditos al sistema.

La inclusión de créditos al sistema para la cadena de generación a partir de aguas residuales consistió en incluir el impacto ambiental evitado por la generación de 1 MJ de electricidad en México para el uso final como generación eléctrica y como sustituto de 1 MJ de energía generado mediante combustión de gas natural (tabla 6). Aunado a esto se considera el impacto evitado por producción de 143 kWh/día para bombeo de agua, para el caso de generación eléctrica.

Créditos al sistema				
	G. de calor		G. eléctrica	
Gas Natural	72	gCO _{2eq} /MJ	594	gCO _{2eq} /kWh
Bombeo de agua evitado	515	MJ/día	143	
	1957	gCO _{2eq} /MJ	884942	gCO _{2eq} /kWh
Fertilizantes evitados	18	gCO _{2eq} /MJ	35	gCO _{2eq} /kWh
	2047	gCO_{2eq}/MJ	12084	gCO_{2eq}/kWh

Tabla 6. Créditos asignados al sistema de agua residual.

Por último, se realizaron dos tablas comparativas con los resultados obtenidos al utilizar como criterio final de asignación de emisiones la asignación energética o el método de créditos. Se cálculo la HC utilizando 3 criterios: 1) asignación de emisiones totales al producto; 2) asignación energética y 3) créditos al sistema, para la cadena de generación de biogás a partir de una planta de tratamiento de aguas residuales, además, se presentan los resultados para dos usos finales: generación de calor y generación eléctrica.

Para esta cadena cuyo uso final es la generación de calor, se observa que la HC de es más elevada que la HC del gas natural si se utiliza el criterio de asignación energética, cuyo resultado es de 161 gCO_{2eq}/MJ, comparada con los 72 gCO_{2eq}/MJ del gas natural, por lo que no representa una solución para mitigación de GEI. (figura 20). Sin embargo, en esta cadena, sucede un aspecto muy interesante, al incluir los créditos al sistema, la HC disminuye hasta -1885 gCO_{2eq}/MJ, lo que nos lleva a suponer que al observar la generación de biogás como un sistema no solo de generación de energía, si no de tratamiento de lodos, se podría considerar una opción interesante debido a sus múltiples ventajas.

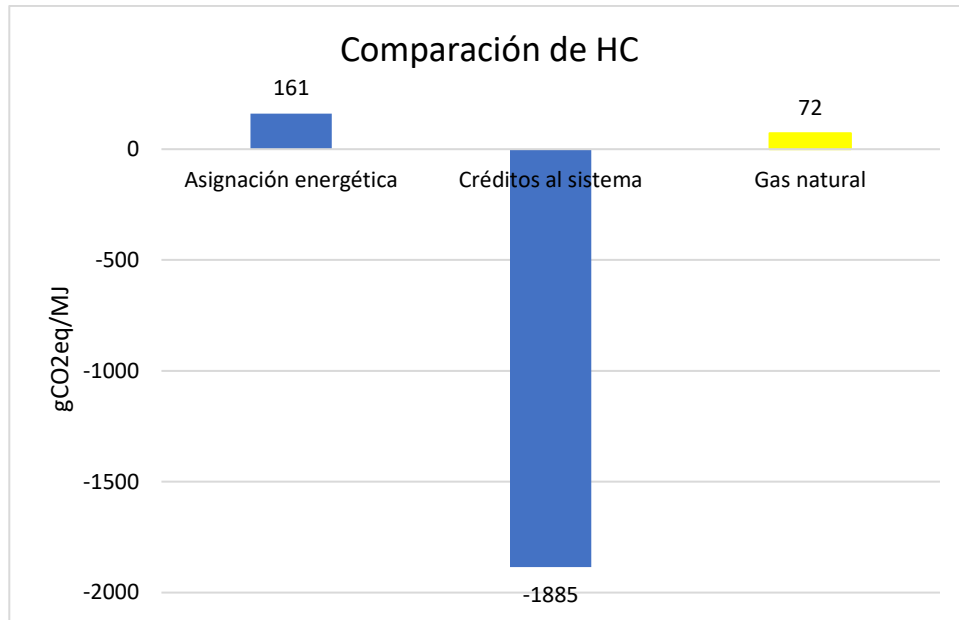


Figura 20. HC para la cadena de generación de biogás a partir de lodos, uso final generación de calor.

En cambio, al observar la generación de biogás a partir de esta cadena, pero con uso final para generación eléctrica, la HC obtenida de 863 gCO_{2e}/kWh, para asignación energética es menor que la HC asociada a la generación eléctrica de la Rex Mexicana, cuyo valor es de 594 gCO_{2e}/kWh (figura 21).

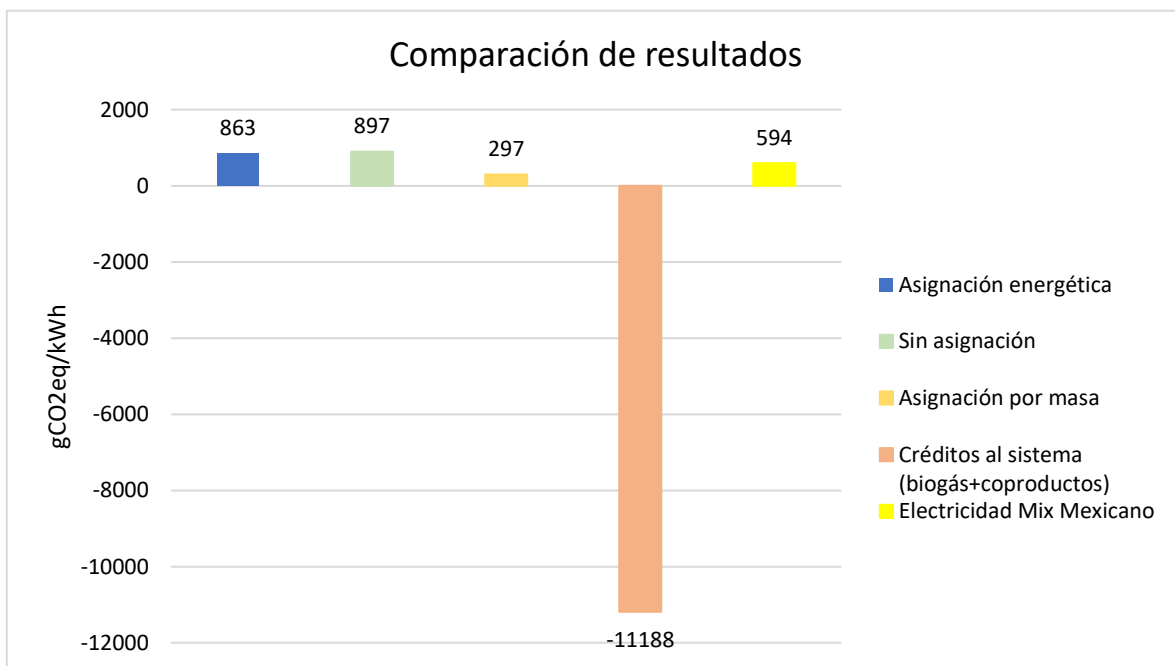


Figura 21. HC para la cadena de biogás a partir de lodos, uso final generación eléctrica.

Al comparar la columna de créditos al sistema de la figura 21, contra cualquiera de las otras dos, se puede observar que existe una diferencia considerable en ambos usos finales. Recordemos que, dentro de la asignación de créditos, se incluyen las emisiones evitadas por la generación de energía eléctrica en México y por la utilización de gas natural, así como las emisiones evitadas por utilizar el digestato como fertilizante que sustituiría fertilizantes sintéticos con sus correspondientes emisiones por su producción.

Cadena 2: Generación de biogás a partir de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

Se realizó el inventario de emisiones de GEI para la generación de biogás, incluyendo dos usos finales: generación de calor (G1), generación eléctrica (G2) y uso en el transporte (G3) (tabla 7).

Proceso		G1	G2	G3
		gCO _{2eq} /día	gCO _{2eq} /día	gCO _{2eq} /día
Recolección	Transporte	9841	9841	9841
	Etapa Industrial			
	Pretratamiento	4917	4917	4917
	Biorreactor 1	3724	3724	3724
	Biorreactor 2	885	885	885
	Fugas en el biorreactor	27249	27249	27249
	Digestato	18517	18517	18517
Mejoramiento	Limpieza	0	0	0.019
	Compresor	-	-	12830
	Soplador	1287	-	-
Uso final		15584	14725	25949
Total		82004	79858	103913

Tabla 7. Inventario de emisiones de GEI para la cadena FORSU. G1: Generación de calor. G2: Generación de electricidad. G3: Transporte.

Se realizó una gráfica comparativa con la finalidad de observar la HC de cada una de las etapas consideradas dentro del ciclo de vida de la producción de biogás, se puede observar que el almacenamiento del digestato y las fugas que se presentan en el biorreactor son las etapas que tiene una mayor contribución a la HC, por lo que es importante prestar atención a esta etapa con la finalidad de disminuir las emisiones y consecuentemente el resultado final para esta cadena (figura 22).

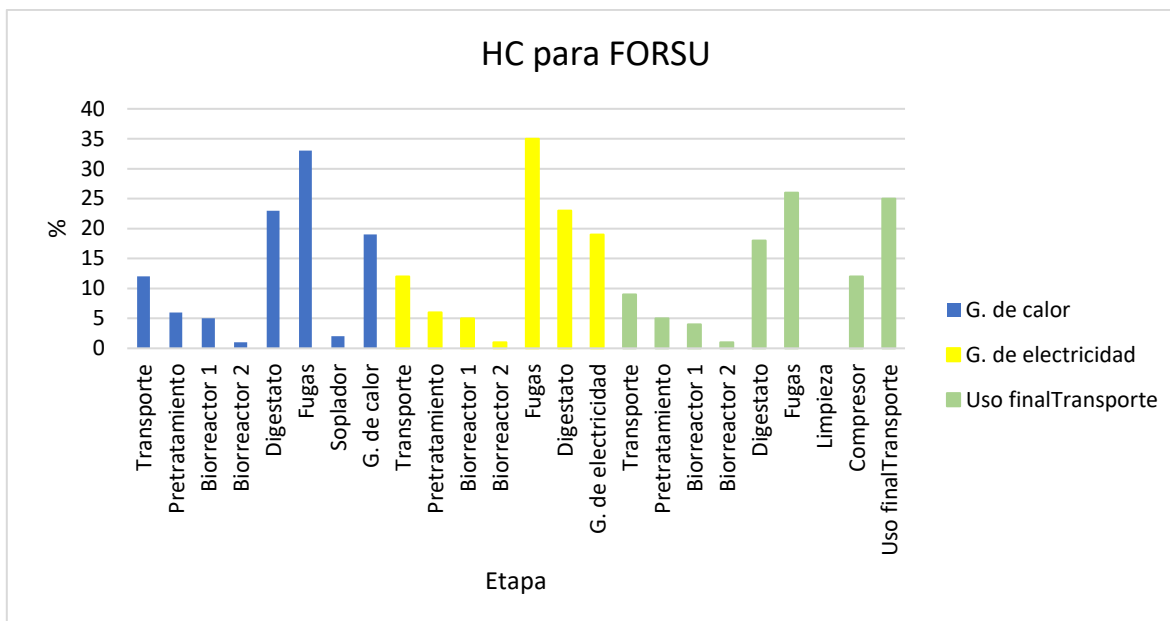


Figura 22. HC para la cadena FORSU, por etapa.

Para los 3 usos finales se realizó asignación energética y asignación de créditos al sistema, los resultados se muestran a continuación:

Criterio 1: Asignación energética.

La asignación energética para el sistema cuyo uso final fue la G. de calor, se realizó sobre un total de 698 MJ que es la energía obtenida de la combustión del producto principal, en este caso el biogás, y del coproducto, es decir los lodos. Para el sistema cuyo uso final fue la generación eléctrica, se realizó sobre un total de 633 MJ que es la energía obtenida del proceso principal y del coproducto, es decir los lodos. Para el último uso final, en transporte, se realizó sobre un total de 1164 MJ (Tabla 8).

Asignación Energética									
Resultados preliminares									
	G. de Calor			G. eléctrica			Transporte		
	PC (MJ/ton)	%	gCO _{2eq} /día	PC (MJ/ton)	%	gCO _{2eq} /día	PC (MJ/ton)	%	gCO _{2eq} /día
Biogás	669	0.99	64784	632.1	0.998	64349	1164	.997	64923
Lodos	4	0.01	349	1.2	0.002	127	4	.0032	210
Total	703			633.3			1168		
Total final			103702				79074		
gCO_{2eq}/MJ	95				gCO₂ eq/kWh	451			
							gCO₂ eq/MJ	89	

Tabla 8. Asignación energética para FORSU uso final G. de Calor, G. eléctrica y transporte.

Una vez utilizado el criterio de asignación energética para los 3 casos, se pueden observar los resultados obtenidos, para el caso cuyo uso final es la generación de calor, las emisiones de GEI ascienden a 95 gCO_{2eq}/MJ, para el segundo uso final se obtienen 451 gCO_{2eq}/kWh y para el tercer uso final el resultado fue de 89 gCO_{2eq}/MJ. Dichos resultados se comparan para el caso de generación de calor con las asociadas a la generación de gas natural, es decir 72 gCO_{2eq}/MJ. Para el caso de generación eléctrica de la Red Mexicana cuyo resultado es de 451 kgCO_{2eq}. Por último, las asociadas a la gasolina 74 gCO_{2eq}/MJ y al gas LP de 65 gCO_{2eq}/MJ.

Criterio 2. Créditos al sistema.

Los créditos incluidos dentro del sistema para la cadena de generación a partir de FORSU consistieron en incluir el impacto ambiental evitado al sustituir 1 MJ de energía generado mediante combustión de gas natural, así como la generación de 1 MJ de electricidad en México para el uso final como generación eléctrica y 1MJ de energía generada mediante la gasolina para el uso final en transporte. Aunado a esto se consideraron las emisiones evitadas al sustituir 4 kg de N y .27 kg de P₂O₅ como fertilizante, cuyas emisiones asociadas son de 11 gCO_{2eq}/MJ (133 gCO_{2eq}/kWh) y .4 gCO_{2eq}/MJ (2 gCO_{2eq}/kWh), respectivamente. Para calcular los kg de N y P₂O₅ obtenidos, se utilizaron valores por defecto: .04 kgN/kgST y .0027 kgP₂O₅/kgST.

Por último, se realizó una gráfica comparativa con los resultados obtenidos al utilizar como criterio final de asignación de emisiones la asignación energética o el método de créditos. Se calculó de la HC utilizando 3 criterios: 1) asignación de emisiones totales al producto; 2) asignación energética y 3) créditos al sistema, para la cadena de generación de biogás a partir de FORSU, además, se presentan los resultados para tres usos finales: generación de calor, generación eléctrica y transporte.

Se puede observar que los resultados de la columna sin asignación y los de la columna de asignación energética son muy similares, debido a que el poder calorífico de los lodos es pequeño comparado con el poder calorífico del biogás; aunado a esto el volumen de lodos, aunque es representativo, no genera que los lodos generen una cantidad considerable de MJ para que se haga una diferencia mayor en los resultados de ambos.

Para la generación de calor a partir de biogás de FORSU, utilizando como criterio de asignación la asignación energética, se observa que es más elevada la HC de dicha cadena que la de su combustible fósil comparable, en este caso el gas natural, siendo la primera de 117 gCO_{2eq}/MJ y contra 72 gCO_{2eq}/MJ. Sin embargo, si se utiliza como criterio la utilización de créditos al sistema, la HC disminuye considerablemente hasta un total de 34 gCO_{2eq}/MJ, resultado que se observa favorable en materia de mitigación respecto al gas natural (figura 23). Los créditos

asumen que efectivamente el sistema desplaza a la electricidad del Mix mexicano y la fracción mencionada de fertilizantes sintéticos.

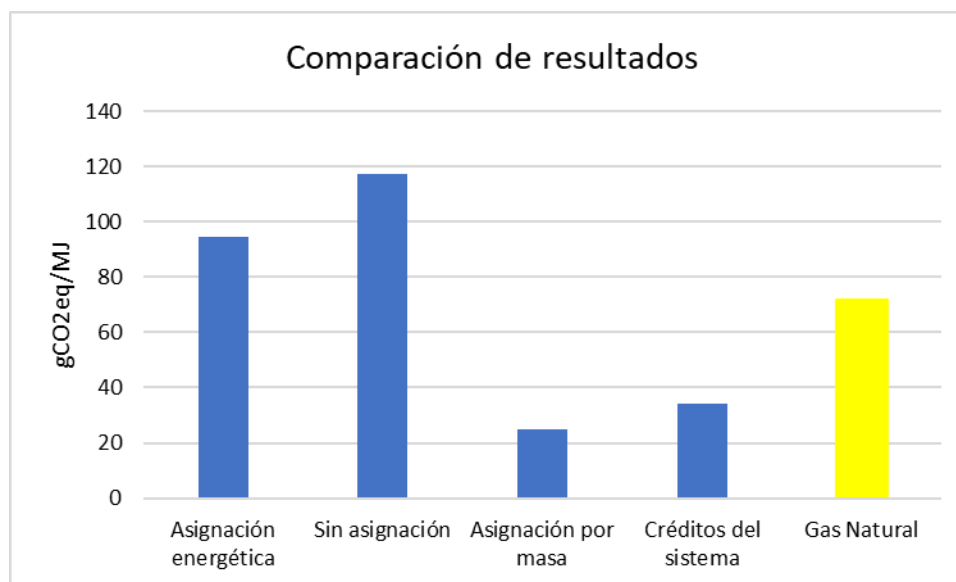


Figura 22. HC para la cadena FORSU, uso final generación de calor.

Para la misma cadena de generación de biogás a partir de FORSU, pero como uso final para la generación eléctrica, se observa que la HC de la cadena es menor que la generada por el mix de generación mexicano, cuya HC es de 594 gCO₂eq/kWh, comparada con 451 gCO₂eq/kWh. Utilizando como criterio la inclusión de créditos al sistema, se obtiene un resultado de -277 gCO₂eq/kWh. Los resultados obtenidos muestran que existe una mitigación de GEI, lo que cumple uno de los objetivos de los biocombustibles (figura 24).

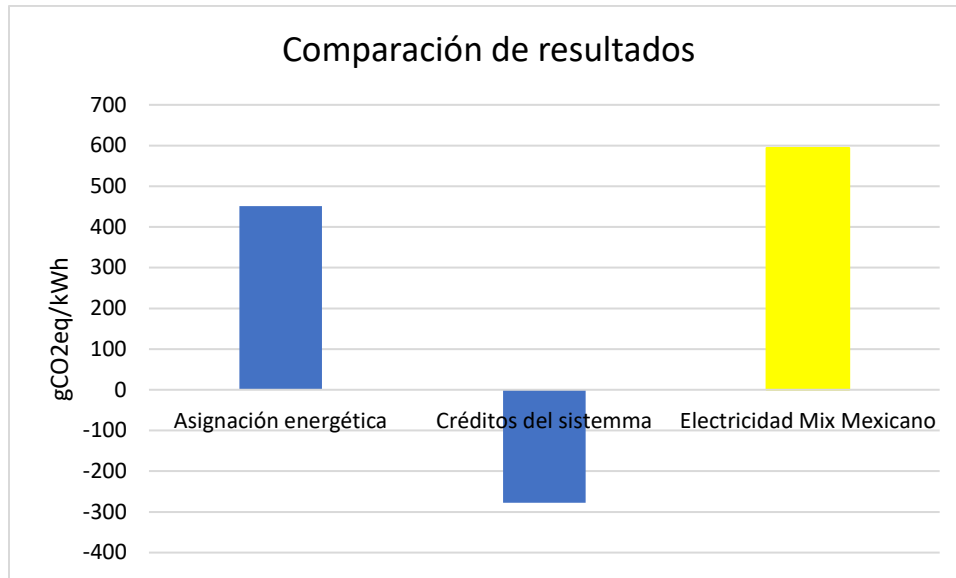


Figura 24. HC para la cadena FORSU, uso final generación eléctrica.

Cabe destacar que en esta cadena se obtiene una HC negativa al incluir los créditos al sistema, lo que indica que se está evitando la emisión de $-277 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ de generar energía de forma convencional, así como las emisiones al sustituir los coproductos obtenidos, como es el P_2O_5 y el N como fertilizante.

Para la misma cadena de generación de biogás a partir de FORSU pero como uso final para el transporte, se observa que la HC de la cadena es mayor que los combustibles fósiles comparables, cuya HC es de $65 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ para el caso de Gas LP y de $84 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$. Utilizando como criterio la inclusión de créditos al sistema, se obtiene un resultado de $9 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$. Los resultados obtenidos muestran que no existe una mitigación de GEI (figura 25).

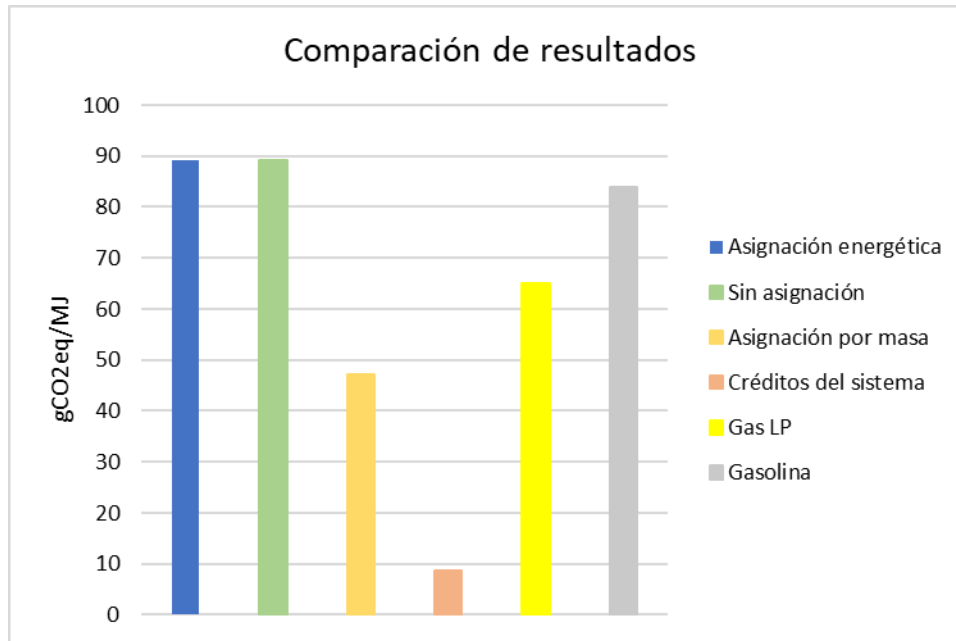


Figura 25. HC para la cadena FORSU, uso final transporte.

Cadena 3: Generación de biogás a partir de cultivos energéticos.

Se realizó el inventario de ciclo de vida de la generación de biogás para cultivo energético, incluyendo tres usos finales: generación de calor (G1), generación eléctrica (G2) y uso en el transporte (G3) (tabla 9). Es importante mencionar que está en esta cadena se incluye la fase agrícola dentro del análisis de ciclo de vida, debido a que se utiliza como materia prima un cultivo destinado exclusivamente a la generación de energía, por lo tanto, las emisiones asociadas al cambio de vegetación, cambio de carbono almacenado en el suelo y cambio de carbono almacenado en la biomasa deben ser cuantificadas dentro del sistema.

		G1	G2	G3
Etapa	Proceso	gCO _{2e} /año	gCO _{2e} /año	gCO _{2e} /año
F. agrícola	Fase Agrícola	18054555	18054555	18054555
CUS	Cambio en el Carbono	-3806733	-3806733	-3806733
	Emisiones Suelo	-12388232	-12388232	-12388232
Recolección	Transporte	3444374	3444374	3444374
Etapa industrial	Pretratamiento	1937888	1937888	1937888
	Biorreactor 1	14882979	14882979	14882979
	Biorreactor 2	14882979	14882979	14882979
	Digestato	33936806	33936806	33936806
	Soplador	3627726	-	-

Mejoramiento	Limpieza	-	-	13260089
	Compresor	-	-	4490640
	Uso final	11424335	30127620	15206027
	Total	85996675	104469903	103901370

Tabla 9. Inventario de ciclo de vida para la cadena cultivo energético. G1: Generación de calor. G2: Generación de Electricidad. G3: Transporte.

Criterio 1: Asignación energética.

La asignación energética para el sistema cuyo uso final fue la generación de calor, se realizó sobre un total de 3659 MJ que es la energía obtenida de la combustión del producto principal, en este caso el biogás, y del coproducto, es decir los lodos. Para el sistema cuyo uso final es transporte, se realizó sobre un total 4870 MJ. Para el último sistema, generación eléctrica, se realizó sobre un total de 895 kWh (tabla 10).

Asignación Energética									
	G1			G2			G3		
	PC (MJ)	%	gCO _{2eq/año}	PC (MJ)	%	gCO _{2eq/año}	PC (MJ)	%	gCO _{2eq/año}
Biometano	3659	1	70746114	3221	0.95	741060026	4870	1	70795375
Lodos	10	0	198501	10	0.05	332002	10	0	149238
	3669		85798174	7.55		74106122			103762131

Tabla 9. Asignación energética para G.1: Generación de calor. G2: Generación Eléctrica y G3: Transporte.

Criterio 2: Créditos al sistema.

La inclusión de créditos al sistema para la cadena de generación a partir de un cultivo energético consistió en incluir el impacto evitado por la generación de 1 MJ de electricidad en México para el uso final como generación eléctrica y como sustituto de 1 MJ de energía generado mediante combustión de gas natural (tabla 11).

Créditos al sistema		
	G. de Calor	G. Eléctrica
	gCO _{2eq/MJ}	gCO _{2eq/kWh}
Gas Natural	71.8	594
Fertilizantes evitados	41	60
	113	654

Tabla 11. Créditos al sistema cultivo energético.

Por último, se realizaron dos tablas comparativas con los resultados obtenidos al utilizar como criterio final de asignación de emisiones la asignación energética o la expansión del sistema. Se cálculo la HC utilizando 3 criterios: 1) asignación de emisiones totales al producto; 2) asignación energética y 3) créditos al sistema, para la cadena de generación de biogás a partir de cultivo energético, además, se presentan los resultados para 3 usos finales: generación de calor, generación eléctrica y transporte (tabla 12).

Huella de carbono para G. de calor							
	Sin asignación	Asignación energética	Créditos al sistema	Gas natural	Red. Eléctrica Mex	Gasolina	Gas LP
gCO_{2eq}/MJ año	67	67	-57	72			
Huella de carbono para G. de electricidad							
gCO_{2eq}/ kWh año	334	333	-267		594		
Huella de carbono para Transporte							
gCO_{2eq}/MJ año	61	60	-50			84	65

Tabla 12. HC para uso final como generación de calor. generación de electricidad y transporte.

Para esta cadena se evaluaron tres usos finales: generación de calor, generación de electricidad y transporte. Para el primer uso final que es la generación de calor, la HC evaluada es menor que su combustible fósil comparable, en este caso el gas natural, para el criterio de asignación energética se obtuvo una HC de 67 gCO_{2eq}/MJ año; para el caso de la inclusión de los créditos al sistema, la HC fue de -57 gCO_{2eq}/MJ año (figura 26).

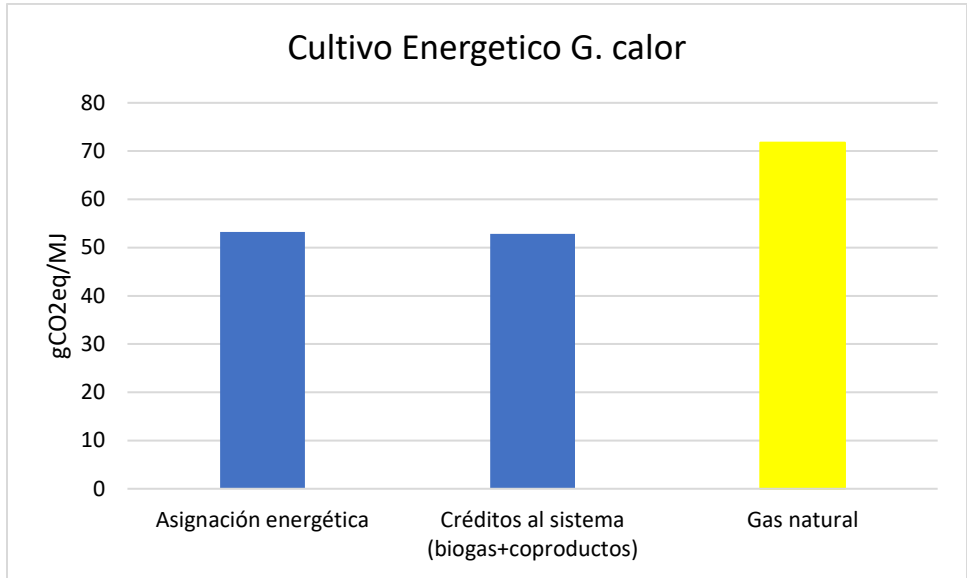


Figura 26. HC para la cadena Cultivo Energético, uso final generación de calor.

Para la misma cadena de generación de biogás a partir de Cultivo Energético, pero como uso final para la generación eléctrica, se observa que la HC de la cadena utilizando el criterio de asignación energética es de 333 gCO₂eq/MJ, menor que la HC asociada a la Red Eléctrica Mexicana. Además, se evalúa la HC incluyendo créditos al sistema, y la HC asociada es de -412 gCO₂eq/MJ (figura 27).

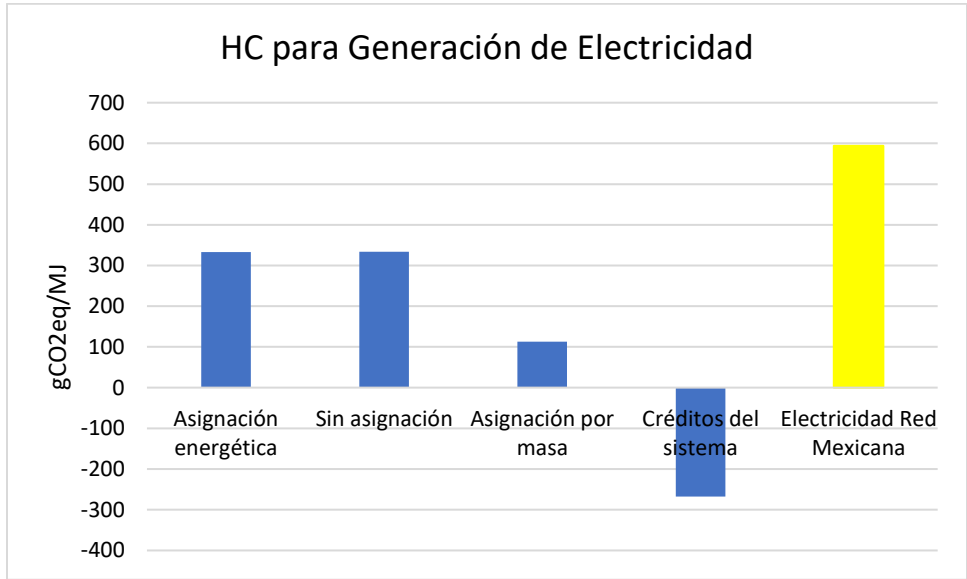


Figura 27. HC para la cadena Cultivo Energético, uso final generación eléctrica.

Para la misma cadena de generación de biogás a partir de Cultivo Energético, pero como uso final para el transporte, se observa que la HC de la cadena utilizando el criterio de asignación energética es de 61 gCO₂eq/MJ. Para este caso, el resultado puede ser favorecedor en términos de mitigación dependiendo de contra que

combustible fósil se compare, por ejemplo, si se compara con la gasolina, cuya HC asociada es de 74 gCO_{2eq}/MJ, presenta mitigación de 13 gCO_{2eq}/MJ, en cambio si se compara con el Gas LP, la mitigación es de solo 4 gCO_{2eq}/MJ. Además, se evalúa la HC incluyendo créditos al sistema, y la HC asociada disminuye considerablemente hasta -14 gCO_{2eq}/MJ (figura 28).

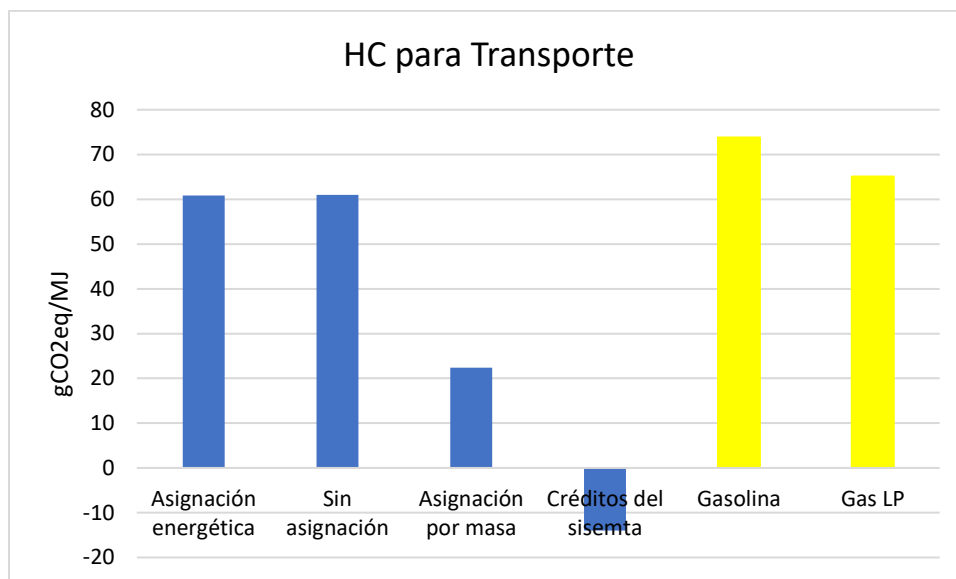


Figura 28. HC para la cadena Cultivo Energético, uso final transporte.

3.5 DISCUSIÓN PRELIMINAR.

Los biocombustibles han sido considerados como alternativas para reemplazar a los combustibles fósiles en aplicaciones de calor y electricidad y que además de que podrían ser una opción viable para la mitigación de GEI. Sin embargo, nuestros resultados señalan que algunas cadenas de generación de energía, emitirían mayores emisiones de GEI en el ciclo de vida que las asociadas a los combustibles fósiles que se quieren reemplazar. De esta forma la energía a partir de biogás no en todos los casos tiene una HC menor que los combustibles fósiles sólo por el hecho de provenir de materia prima orgánica o residuos.

En este trabajo fueron evaluadas 3 cadenas de generación de biogás a partir de diferentes sustratos y con tecnologías semejantes: agua de tratamiento residual, FORSU y cultivo energético. Con dos o 3 usos finales, dependiendo de la cadena: generación de calor, generación de electricidad y como uso final para el transporte. Los resultados obtenidos de la HC, para 1 MJ de energía generada, utilizando como

criterio de asignación la asignación energética, varían considerablemente de una cadena a otra.

La HC de la cadena de generación a partir aguas de tratamiento residual fue de 161 gCO_{2eq}/MJ para generación de calor y 863 gCO_{2eq}/kWh para generación eléctrica, lo que se puede interpretar como un aumento del 123% y 45% de emisiones de GEI, respectivamente. Para la cadena de cultivo energético la HC fue de 67 gCO_{2eq}/MJ para generación de calor; de 333 gCO_{2eq}/kWh para generación eléctrica y de 61 gCO_{2eq}/MJ para uso en el transporte, lo que se interpreta como una mitigación de 7%, 44% y 27%, respectivamente. El sistema de FORSU como materia prima, se obtuvieron valores de 95 gCO_{2eq}/MJ para generación de calor, 451 gCO_{2eq}/kWh para generación eléctrica y 89 gCO_{2eq}/MJ para uso en el transporte, lo que se traduce en un aumento del 31% para calor, una mitigación de 24% para generación eléctrica y un aumento del 6% para uso en el transporte. Observando los resultados obtenidos, puede interpretarse que el sustrato utilizado, la tecnología empleada y el uso final que se le dé al biogás determinan los impactos potenciales generados por las emisiones de GEI durante el ciclo de vida de dicha cadena. Si se comparan los resultados de HC para generación de calor con la HC asociada al gas natural que es de 72 gCO_{2eq}/MJ, observamos que sólo la cadena de generación a partir de cultivo energético presenta mitigación de GEI; en cambio para uso final como generación eléctrica y comparando los resultados de HC con la asociada a la de la Red Eléctrica Mexicana que es de 594 gCO_{2eq}/kWh, observamos que 2 de las 3 cadenas presentan mitigación de GEI, únicamente el caso de aguas de tratamiento residual no presenta mitigación.

Como se señaló en la sección 2, el criterio de asignación de emisiones juega un papel fundamental en los resultados de HC. Por ejemplo, al utilizar otro criterio de asignación, como la asignación por masa los resultados varían significativamente. Tal es el caso de la cadena de FORSU, que, al utilizar asignación por masa, la HC para generación de calor disminuye hasta 25 gCO_{2eq}/MJ, presentando un 65% de mitigación comparado con el gas natural. En cambio, la HC de la generación de electricidad, disminuye hasta 120 gCO_{2eq}/kWh, presentando una mitigación del 80% comparada con la HC asociada a la generación de electricidad mediante la Red eléctrica mexicana. Por lo que se puede afirmar que el criterio de asignación de emisiones es sumamente importante al momento presentar los resultados finales y esto influye de manera significativa para evaluar positiva o negativamente una planta en materia de mitigación, he aquí la importancia de estandarizar un criterio de asignación de emisiones en la metodología propuesta.

Cada criterio de asignación tiene sus ventajas e inconvenientes, por ejemplo, la asignación por masa es más fácil de aplicar, pero cuando los coproductos son de un tipo que no se puede cuantificar como masa (como energía) los resultados no parecen justo al momento de la asignación. Otra desventaja es que los resultados no reflejan necesariamente bien el sistema. Por ejemplo, en el caso de lodos, su volumen es muy elevado comparado con el volumen de biogás generado, por lo tanto, al asignar bajo este criterio, la mayor parte de las emisiones se verían reflejadas hacia los lodos y el biogás presentaría un porcentaje un pequeño de las mismas.

Es importante mencionar que los límites del sistema a evaluar incluían desde la extracción de la materia prima hasta su uso final. El uso final de la energía es importante para la HC, en nuestros casos si los límites del sistema no incluyeran esta etapa, la HC de cada cadena disminuiría considerablemente. Por ejemplo, para la cadena de FORSU, la HC disminuiría de generar 117 gCO_{2eq}/MJ, hasta 93 gCO_{2eq}, lo que indica que, como para generación de calor, el uso final representa el 21% del impacto final, para el caso de generación de electricidad representa el 19% de la misma y para el uso en sector transporte, la etapa final representa el 27%. De igual forma, para el caso de la planta de tratamiento de agua residual, la HC disminuiría de 161 gCO_{2eq}/MJ hasta 117 gCO_{2eq}/MJ, por lo que, para el caso de generación de calor, esta etapa representa un 27% del impacto final y para el caso de generación eléctrica, disminuiría de 863 gCO_{2eq}/kWh a 700 gCO_{2eq}/kWh, por lo que esta última etapa representa un 22%.

Otro punto clave para evaluar si existe mitigación de cada una de estas cadenas respecto a algún combustible fósil, es precisamente evaluar contra qué tipo de combustible fósil será comparado. En este trabajo dicha comparación se hizo con el gas natural, la generación de energía eléctrica por la Red Mexicana y la gasolina, sin embargo, si fueran considerados otros combustibles fósiles como es el carbón mineral, el diésel o el combustóleo, esta mitigación podría resultar más favorable para las cadenas, tal como podemos observar en la figura 29 y 30. En la figura para el uso final como generación de calor, la mitigación para la cadena de cultivo energético es aún más favorable si se compara contra el carbón mineral o diésel. Para el caso de aguas residuales su HC es más elevada que la asociada al gas natural, diésel y combustóleo, sin embargo, es exactamente igual a la asociada a la del carbón mineral, por lo tanto, al ser comparado de esta forma se podría considerar como una opción viable para la generación de energía. Caso contrario para el uso final como generación eléctrica, ya que, si en vez de comparar con la HC asociada a la generación eléctrica de la Red Mexicana se hiciera contra la

utilización de carbón mineral, sólo las cadenas de cultivo energético y lodos presentarían mitigación.

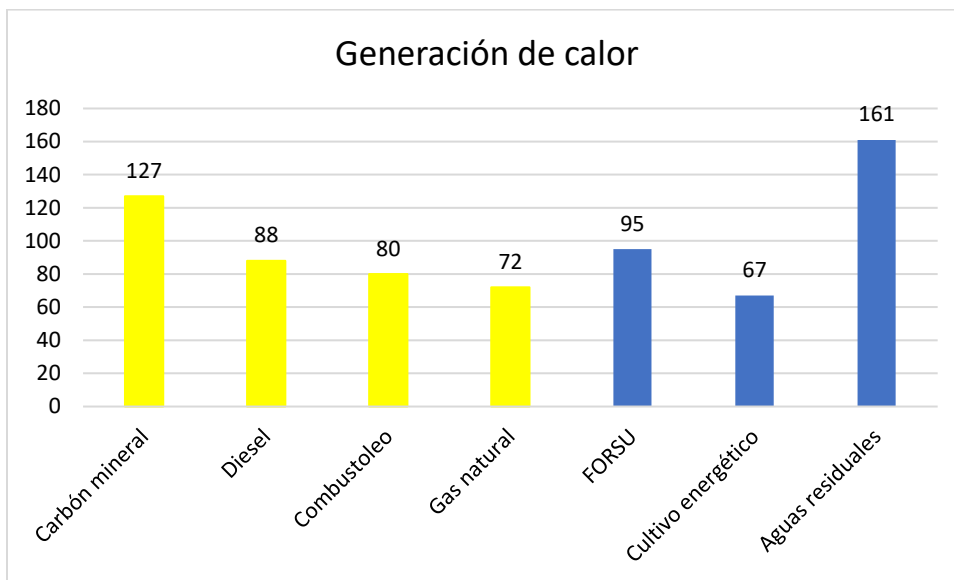


Figura 29. Comparacion de la HC para generación de calor, contra diversas fuentes fósiles.

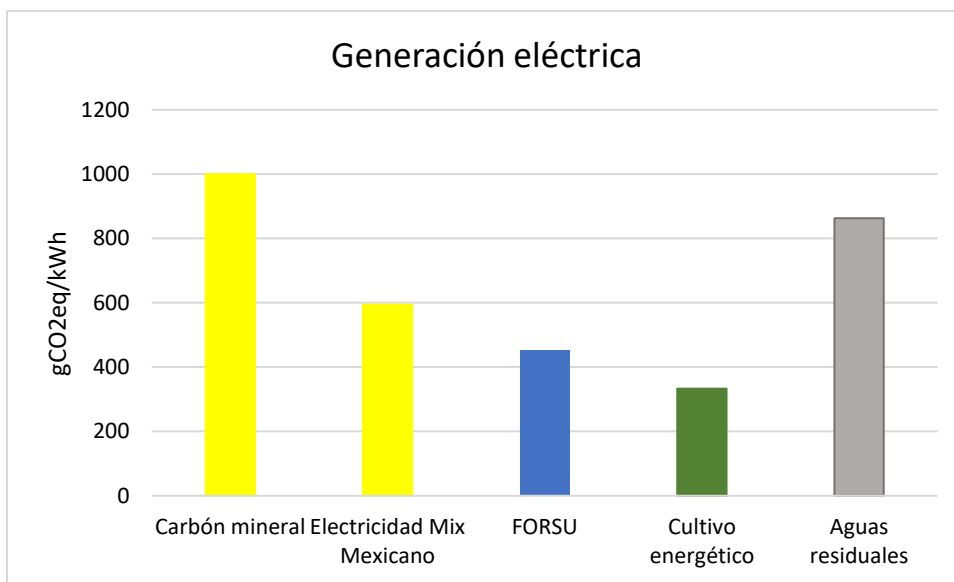


Figura 30. Comparacion de la HC para generación eléctrica, contra diversas fuentes fósiles.

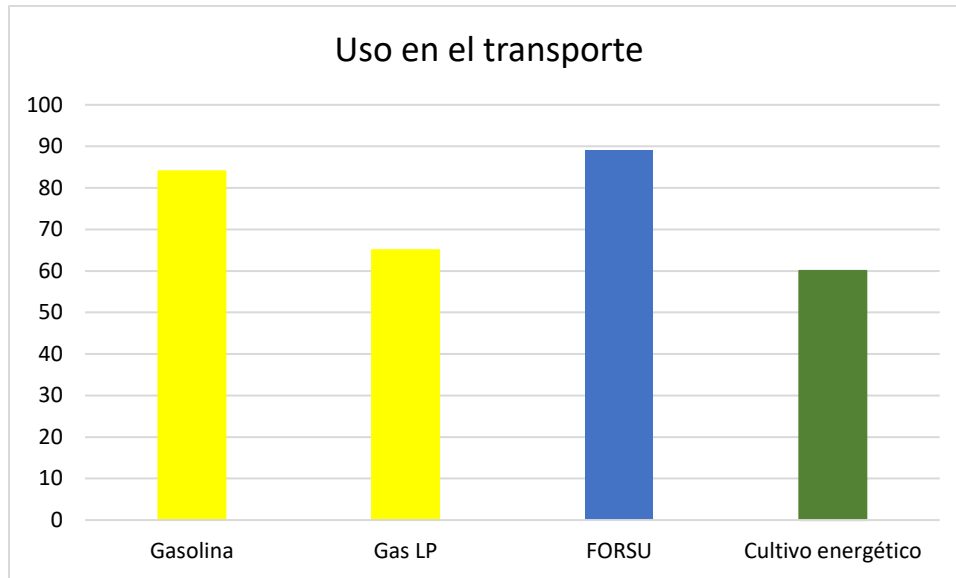


Figura 31. Comparación de la HC para transporte, contra diversas fuentes fósiles.

Otro aspecto importante a destacar es que dentro del cálculo de la HC también se realizó la inclusión de créditos al sistema. Lo que significa incluir la mitigación que presenta el uso de coproductos como alternativas de productos de origen fósil al ocasionar que dichos productos no sean generados. Estos créditos se añaden con la finalidad de incentivar la visión sistémica de este tipo de tecnologías y se observó que dicha inclusión mejora significativamente los resultados obtenidos.

Para el caso de la cadena de lodos de tratamiento de una planta de agua residual se consideró el impacto evitado por la generación de 1 kWh de electricidad en México para el uso final como generación eléctrica y como sustituto de 1 MJ de energía generado mediante combustión de gas natural. En esta cadena, al incluir los créditos al sistema, se obtiene una HC de $-1885 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ para generación de calor y de $-10639 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ para generación eléctrica. En este sistema, el producto principal es el agua tratada y la generación de biogás ocurre como un coproducto cuando la digestión anaerobia del agua residual municipal se lleva a cabo en un reactor de flujo ascendente del tipo UASB y su producción depende principalmente de los siguientes factores: concentración y composición de la materia orgánica presente, temperatura de proceso y características del reactor, ya que su principal objetivo es la purificación del agua. Independientemente de lo anterior, hay evidencias que indican que, aunque el biogás no se utilice, al tener como objetivo la generación del mismo dentro de las plantas de tratamiento, es muy viable lograr una mitigación de GEI, por lo que se sugiere su producción (López, Ramírez, Gomez, & Morgan, 2017). Existe una investigación realizada por Noyola y su equipo del Instituto de Ingeniería de la UNAM que hablan sobre el impacto al Cambio Climático del proceso de tratamiento, desde el pretratamiento hasta el manejo de lodos

(Noyola et al., 2013). Es importante mencionar que a pesar de que la del sistema de aguas residuales cuenta con generación de energía a partir de celdas fotovoltaicas, su HC es muy elevada, sobre todo en la etapa de tratamiento secundario, esto se debe a que la bomba está en funcionamiento 24 horas al día.

Para el caso de FORSU se consideró el impacto ambiental evitado al sustituir 1 MJ de energía generado mediante combustión de gas natural, y la generación de 1 MJ de electricidad en México para el uso final como generación eléctrica. Aunado a esto se consideraron las emisiones evitadas al sustituir 4 kg de N y .27 kg de P₂O₅ como fertilizante, cuyas emisiones asociadas son de 11 gCO_{2eq}/MJ (133 gCO_{2eq}/kWh) y .4 gCO_{2eq}/MJ (2 gCO_{2eq}/kWh), respectivamente. Al utilizar el criterio de créditos al sistema, la HC disminuye considerablemente hasta un total de 34 gCO_{2eq}/MJ, comparada con la HC 95 gCO_{2eq}/MJ obtenida sin incluirlos, resultado que se observa favorable en materia de mitigación respecto al gas natural. Para este sistema el tratamiento anaerobio de FORSU, ofrece múltiples beneficios, en primera instancia reduce el riesgo sanitario que representa el confinar en tiraderos y rellenos al aire libre de esos residuales, y de acuerdo a algunos autores disminuye los requerimientos de energía e impacto ambiental que representan otros tipos de disposición final de estos residuos, además, el FORSU es un sustrato atractivo para la digestión anaerobia debido a su abundancia y disponibilidad (Mata et al. 2000; Kaan et al., 2010; Moestedt et al. 2016).

Para el caso del cultivo energético, la inclusión de créditos al sistema consistió en incluir el impacto ambiental evitado por la generación de 1 MJ de electricidad en México para el uso final como generación eléctrica y como sustituto de 1 MJ de energía generado mediante combustión de gas natural, así como 41 gCO_{2eq}/MJ evitados por la generación de fertilizando de origen fósil. Con esta inclusión de créditos, la HC para uso final como generación de calor, las emisiones disminuyen hasta -6 gCO_{2eq}/MJ. Para la misma cadena, pero como uso final para la generación eléctrica, se observa que la HC es de -267 gCO_{2eq}/MJ.

En este trabajo, es posible observar que el balance de GEI puede variar significativamente, dependiendo de la materia prima empleada, la tecnología de producción, la sub utilización de los equipos, la asignación de emisiones y la inclusión de créditos. Además, debe resaltarse que, para los 3 sistemas de generación de biogás evaluados, se observó que los parámetros que presentan una mayor sensibilidad respecto a la HC obtenida y en los cuales una mínima modificación tiene un gran impacto, son:

- El almacén del digestato por las fugas.
- El porcentaje de fugas de CH₄ durante la digestión anaerobia.
- El rendimiento de producción de biogás.

- Tecnología empleada para la conversión de energía.

El almacén del digestato, representa un porcentaje importante dentro del impacto ambiental de 2 de las 3 cadenas de generación de biogás evaluadas en este trabajo, además, se encontró en la bibliografía casos muy similares en los que esta etapa representa el mayor impacto en la categoría de Cambio Climático, es decir, emisiones de CO₂ (Fusi, Bacenetti, Fiala, & Azapagic, 2016). Se encontró que con la finalidad de disminuir el impacto en la HC de esta etapa, se ha propuesto la utilización de sistemas de almacén cerrado a través de membranas herméticas (Boulamanti, Donida Maglio, Giuntoli, & Agostini, 2013). Por lo que se propone el monitoreo las emisiones a lo largo de la cadena de producción con la finalidad de que los impactos para esta categoría disminuyan considerablemente o almacenarlo de forma cerrada y bajo condiciones controladas.

En cuanto las emisiones fugitivas de CH₄ producidas durante la digestión anaerobia, pueden ser consecuencia de la ineficiencia en la captura del mismo, a la falta de cierre hermético de los digestores, malas prácticas de operación y de mantenimiento (Ardolino, Parrillo, & Arena, 2018). Es importante mencionar que dichas fugas fueron consideradas de un 2% de la generación de biogás en cada planta, sin embargo, se ha informado que pueden representar entre 2-10% de las emisiones totales de CH₄ (Dumont et al., 2013; Flesch, Desjardins, & Worth, 2011; Yoshida, Mønster, & Scheutz, 2014). Por lo tanto, para el caso de la planta de FORSU para generación de electricidad, de presentar una HC de 451 gCO_{2eq}/kWh, al considerar emisiones fugitivas del 9%, casi el máximo de las reportadas, dicha HC aumentaría hasta 997 gCO_{2eq}/kWh, lo que la convertiría en una cadena que no presenta mitigación de GEI, al contrario, su HC sería mucho más elevada que la del combustible fósil asociado.

Respecto al rendimiento de producción de biogás y la tecnología empleada para la obtención de energía, es necesario encontrar nuevos métodos y equipos que permitan sistemas más eficientes. Por ejemplo, Blanco et al, realizaron una investigación con la finalidad de conocer la eficiencia de diferentes equipos para la producción de electricidad, que es una de las aplicaciones más beneficiosas. En su investigación mencionan que los motores de combustión interna son los más utilizados en comparación con las turbinas de gas y microturbinas por varias ventajas: presentan una alta eficiencia (entre el 25% y 35%), son de bajo costo por kW, existen en varios tamaños adecuados al flujo de biogás obtenido, es posible añadir o quitar los motores según el flujo de biogás. Sin embargo, las desventajas más sobresalientes de estos mismos motores de combustión interna son relativamente elevados sus costos de mantenimiento y emisiones de GEI a la atmosfera.

CAPÍTULO 4. POLÍTICA PÚBLICA Y AMBIENTAL EN MÉXICO en materia de Cambio Climático.

Uno de los principales objetivos de este trabajo es conocer la viabilidad de utilizar la metodología desarrollada para el cálculo de la HC como herramienta para la generación de lineamiento de políticas orientadas a mitigar emisiones de GEI de las tecnologías empleadas en el sistema energético mexicano. Por lo tanto, es necesario conocer la base política de México en materia de cambio climático, así como la forma en que otros países han generado políticas exitosas utilizando información que arrojan metodologías similares de cálculo de la HC para cumplir objetivos nacionales en materia de reducción de emisiones de GEI.

Para términos de estas tesis, se entiende por lineamiento a los aspectos a tomar en cuenta para la formulación de políticas públicas a partir del conocimiento técnico y científico.

4.1 Política.

La política es una actividad orientada a la toma de decisiones de un grupo para alcanzar ciertos objetivos. También puede definirse como una manera de ejercer el poder con la intención de resolver o minimizar el choque entre los intereses encontrados que se producen dentro de una sociedad (Jiménez, 2012). En tanto que las políticas públicas son un conjunto de acciones estructuradas, estables y sistemáticas en las cuales el gobierno busca beneficios para los ciudadanos, como resultado de un proceso de investigación, que implica el uso de un método para asegurar que la decisión tomada es la mejor alternativa posible para resolver un determinado problema público (Corzo, 2013; Peters & Wats, 2005).

Las políticas ambientales son el conjunto de objetivos, principios, criterios y orientaciones generales cuyo objetivo es la protección del medio ambiente de una sociedad particular (Rodríguez, 2002). Esas políticas se ponen en marcha mediante una amplia variedad de instrumentos y planes. Respecto a la Política Ambiental en México, se estableció durante los años ochenta y noventa, fue en el PND 1983-1988 en el cual se incluyó por primera vez el tema ecológico como eje importante en el desarrollo social y económico del país. En 1987, se elevó a rango constitucional la obligación de preservar y restaurar el equilibrio ecológico y en 1988 se publicó la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual ha sido el base de la operación de la política ambiental hasta nuestros días.

Generalmente las políticas ambientales han sido generadas en respuesta a las urgencias derivadas principalmente de la contaminación antropogénica, producida por la expansión urbana e industrial, la deforestación, la erosión de los suelos, el deterioro de los recursos del mar y la contaminación por la actividad de hidrocarburos y minera. Sin embargo, es visible una tendencia a su prevención a

partir de la Conferencia de Río en 1992. En 1992 México firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), comprometiéndose a realizar acciones de mitigación del cambio climático; crear programas que atiendan este problema; integrar inventarios nacionales de las emisiones de GEI y presentar información periódica sobre las medidas que se están adoptando.

El primer acuerdo importante sobre mitigación del Cambio climático se llevó a cabo en La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1997, dando origen al Protocolo de Kioto. Dentro de este acuerdo, los países industrializados se comprometían a reducir sus emisiones de GEI. Este protocolo entró en vigor en 2005, y cada uno de los países adheridos adoptó distintos acuerdos voluntarios de reducción de emisiones.

Se ha reconocido la necesidad de que las acciones de mitigación de Cambio Climático incluyan distintas herramientas de planeación, política e instrumentos económicos, así como un diagnóstico, planificación, medición, monitoreo, reporte, verificación y evaluación de las emisiones nacionales (CDHCU, 2016).

El marco normativo o los instrumentos legales que aplican para regular en materia ambiental en México son: La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, los tratados y convenios internacionales en los que participa, leyes generales y federales, reglamentos, Normas Oficiales Mexicanas (NOM), Normas Mexicanas (NMX), decretos y acuerdos, constituciones estatales, leyes estatales y bandos municipales. En materia ambiental, la Ley que es considerada la base para cualquier política, es la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

A continuación, se presentan las principales acciones de política del gobierno mexicano para combatir el cambio climático.

4.2 Ley general de cambio climático

México ha comenzado su lucha contra el cambio climático mediante el establecimiento de la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que determina de manera clara el alcance y contenido de la política nacional de CC, define las obligaciones de las autoridades del Estado y las facultades de los tres órdenes de gobierno, además, establece los mecanismos institucionales necesarios para enfrentar este reto; tiene como objetivo culminar en un plan de mitigación con metas específicas para el 2050, para lo cual precisa de acciones no condicionadas (que México puede ejecutar de manera soberana) y condicionadas (para las cuales necesita recursos del extranjero (CESOP, 2017).

La LGCC fue publicada en el 2012 y reformada en el 2018, sus principales objetivos que son de interés para la realización de este trabajo, son: “Garantizar el derecho a un medio ambiente sano y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones GEI”. Además, establece necesario “Regular las emisiones de GEI para que México contribuya a lograr la estabilización

de sus concentraciones en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático considerando, en su caso, lo previsto por el artículo 2º de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y demás disposiciones derivadas de la misma”, así como: “Regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático” (LGCC, 2012).

Para lograr la coordinación efectiva de los distintos órdenes de gobierno y los sectores público, privado y social, la LGCC prevé la integración del Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC): “Este sistema debe propiciar sinergias para enfrentar de manera conjunta la vulnerabilidad y los riesgos del país ante el fenómeno y establecer las acciones prioritarias de mitigación y adaptación”. El SINACC lo integran la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC); el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC); el Consejo de Cambio Climático (C3); las entidades federativas; las asociaciones de autoridades municipales; y el Congreso de la Unión. Está integrada por 13 secretarías de Estado: SEGOB, SRE, SEMAR, SHCP, SEDESOL, SEMARNAT, SENER, SE, SAGARPA, SCT, SEP, SSA y SECTUR.

A disposición de esta Ley se crea el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) como un organismo público descentralizado de la administración pública federal. El INECC es la institución encargada de realizar los análisis de prospectiva sectorial y de colaborar en la elaboración de estrategias, planes, programas e instrumentos relacionados con cambio climático.

Además, la LGCC establece para la política nacional de mitigación que el país debe privilegiar las acciones con mayor potencial de reducción de emisiones al menor costo y que, a la vez, brinden cobeneficios de salud y bienestar para la población.

México no sólo fue el primer país en vías de desarrollo en contar con una ley en el tema de cambio climático, sino también en presentar sus Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, para lo cual establecido compromisos internacionales muy específicos con la finalidad de lograr los objetivos planteados.

4.2.1 Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030.

México ha emprendido acciones para enfrentar el cambio climático, procediendo su instrumentación a través de la conformación del marco institucional previsto en la Ley, así como el diseño e implementación de los instrumentos de política pública que contempla.

En 2013, se instaló la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) y del Consejo de Cambio Climático (C3) y se aprobó el Estatuto Orgánico del nuevo Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

El gobierno federal implementó la Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40 y el Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. Adicionalmente, se encuentra en operación el Fondo de Cambio Climático y, desde el 2014, entró en vigor en el país un impuesto al carbono. Ese mismo año se expidió el Reglamento del Registro Nacional de Emisiones y se instaló el Sistema Nacional de Cambio Climático.

El gobierno de México estableció un marco ambiental regulatorio que incluye la Estrategia Nacional de Energía 2012-2026 en el que la Secretaría de Energía ha fijado como meta incrementar la participación de energías limpias.

Con base en la LGCC, los principales compromisos de México, en el sector energético e industrial son:

- Generar el 35% de energía limpia en el 2024 y 43% al 2030. La energía limpia incluye fuentes renovables, la cogeneración eficiente con gas natural y termoeléctricas con captura de CO₂.
- Sustituir en la industria nacional los combustibles pesados por gas natural, energías limpias y biomasa.
- Reducir en 25 % las fugas, venteo y quemas controladas de metano;
- Controlar las partículas negras de hollín en equipos e instalaciones industriales.
- El Objetivo 7 de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible, “Energía Asequible y No Contaminante”, el cual tiene entre sus metas, al 2030, aumentar el porcentaje de energía renovable para la generación de energía, así como aumentar la cooperación internacional a fin de facilitar el acceso a la investigación y las tecnologías energéticas no contaminantes, incluidas las fuentes de energía renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructuras energéticas y tecnologías de energía no contaminante (ONU, 2015).
- También, para dar cumplimiento al Acuerdo de París, México presentó su contribución determinada nacionalmente (NDC), en la que se compromete a reducir el 22% de sus emisiones de GEI y 51% de carbono negro para 2030 de manera no condicionada, es decir, con sus propios recursos. También, condicionado al apoyo y cooperación internacional, estas metas pueden aumentar a 36% y 70%, respectivamente.

Respecto al uso del suelo, el cambio de uso del suelo y la silvicultura (USCUSS), que se refiere a la manera en la que los seres humanos utilizan una superficie determinada, se considera un sector prioritario para las estrategias y acciones climáticas de México, tanto por su potencial de mitigación como de adaptación y que además las acciones que se realicen tienen impactos en otros temas de la agenda ambiental de México, como son la protección de la biodiversidad y sus servicios ambientales. Este sector se considera tan importante debido a que no sólo

se traduce en emisiones de GEI a la atmósfera, si no que mediante la fotosíntesis de la vegetación existente se absorbe CO₂ de la atmósfera, por lo que, al igual que los mares, actúa realmente como un “sumidero” de CO₂ (Ruiz, 2014).

4.2.2 Estrategia Nacional de Cambio Climático.

Es el instrumento rector de la política nacional para enfrentar los efectos del cambio climático y lograr una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono. Este instrumento describe los ejes estratégicos y líneas de acción a seguir con base en la información disponible del entorno presente y futuro, para así orientar las políticas de los tres órdenes de gobierno (SEMARNAT, 2013).

La sustitución de combustibles con altas emisiones de carbono por alternativas de bajo carbono, así como la mejora de la eficiencia energética en la transmisión y distribución de energía podría ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (European Climate Foundation (ECF) et al., 2014). Las fuentes de energía renovable tienen un importante potencial para reducir las emisiones de GEI.

En México se han buscado opciones que permitan establecer obligaciones respecto al uso de fuentes limpias, reducción de emisiones de GEI y eficiencia en el uso de energía en el sector eléctrico. Como respuesta a los acuerdos de la COP 21, fue aprobada la ley de transición energética que representa una oportunidad de mantener su liderazgo internacional en materia de cambio climático y reforzar su compromiso para cumplir las metas de reducción de emisiones establecidas en la Ley General de Cambio Climático.

Como se puede observar, México ha establecido un amplio marco ambiental regulatorio en materia de cambio climático y mitigación de emisiones de GEI, que permitan establecer obligaciones respecto al uso de fuentes limpias, reducción de emisiones de GEI y eficiencia en el uso de energía en el sector eléctrico. Una vez presentado el marco ambiental regulatorio en México, es importante conocer el procedimiento para la generación de políticas en el país e identificar la etapa o etapas de este proceso en donde se puede establecer lineamientos a partir de la evaluación de la huella de carbono.

4.3. Elaboración de las Políticas Públicas en México.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos dota al Estado de recursos suficientes para contar con una administración pública eficaz, y proporciona las herramientas necesarias para la formulación y administración de las políticas públicas, que tienen como propósito resolver problemas que afectan de forma directa o indirecta a una sociedad. Ante la decisión de promover políticas de mejora, tanto las autoridades como los diversos grupos de interés, es necesario

articular, realizar y coordinar una serie de acciones que una vez estructuradas y puestas en marcha, facilitan la obtención de resultados específicos. Bajo esta perspectiva, se le denomina proceso de planeación al diseño, elaboración y articulación de las acciones y recursos necesarios para la operación de planes y propuestas de trabajo específicas que conduzcan a la obtención de resultados particulares en un periodo de tiempo determinado.

La formulación y puesta en marcha de una política pública, requiere de la participación y el esfuerzo coordinado de grupos y actores tanto gubernamentales como de la sociedad, regularmente su creación está encaminada a la atención de demandas y necesidades sociales que son identificados como un problema público.

De inicio es importante establecer claramente a quién afecta el problema, en dónde se presenta y cuál es la magnitud de las alteraciones que provoca; lo que implica el análisis tanto de los aspectos sociales y políticos de la situación para dar solución al problema identificado. Para facilitar este proceso se puede utilizar la metodología del marco lógico.

Debido a que el objetivo de este trabajo es conocer la viabilidad de utilizar la metodología desarrollada para el cálculo de la HC como herramienta para la generación de lineamiento de políticas orientadas a mitigar emisiones de GEI en las cadenas de generación de biogás, es necesario conocer cómo en México se generan las políticas públicas con la finalidad de conocer en qué medida podría contribuir esta información a la generación en un futuro de las mismas.

4.3.1 Metodología del marco lógico

La Metodología de marco lógico, es una herramienta para facilitar el proceso de conceptualización, diseño, ejecución y evaluación de proyectos. Puede utilizarse como base para la generación de políticas, desde la identificación y valoración de actividades que encajen en el marco del Plan Nacional de Desarrollo (PND), en la preparación del diseño de los proyectos de manera sistemática y lógica, en la valoración del diseño de los proyectos, en la implementación de los proyectos aprobados y en el Monitoreo, revisión y evaluación del progreso y desempeño de la misma.

Esta metodología marca los siguientes pasos (figura 32):

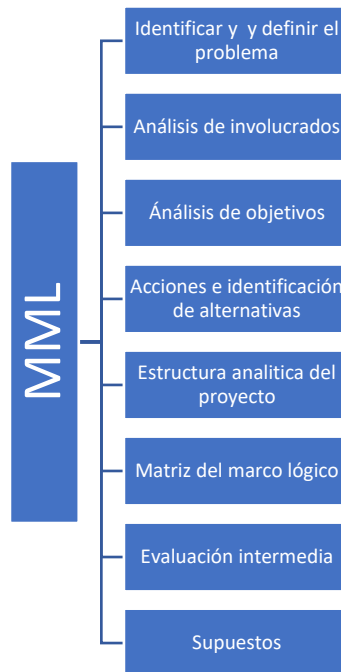


Figura 32. Metodología del Marco Lógico para la generación de Políticas Públicas.

1. Análisis de involucrados

Consiste en identificar los principales actores involucrados que pudieran estar directa o indirectamente relacionados con el problema y analizar su posición frente a la política a generar, no sólo debe tenerse en cuenta la posición actual, sino que debe la futura.

2. Identificar y definir el problema.

La principal característica de las políticas públicas es que deben responder a un problema claro y delimitado. Esta etapa se inicia con la delimitación del problema de interés, cuantificando el número de afectados, las zonas geográficas donde residen y los costos sociales que el problema ha generado.

- **Lluvia de ideas:** Partir de una primera “lluvia de ideas”, establecer cuál es el problema central, para esto se aplican los criterios de prioridad y selectividad. Se recomienda: formular el problema central en estado negativo, centrar el análisis de causas y efectos en torno a un solo problema central, no confundir el problema con la ausencia de una solución, análisis de nodos críticos y crear una matriz de incidencias.
- **Graficar el árbol de efectos.** Jerarquizar los efectos más importantes del problema.
- **Graficar el árbol de causas:** A partir del problema central, se identifican todas las causas que pueden originar el problema, logrando el encadenamiento que tienen estas causas. Es muy importante llegar a las causales primarias e independientes entre sí que se piensa que están

originando el problema. Mientras más raíces se puedan detectar en el árbol de causas, más cerca se estará de las posibles soluciones.

- **Graficar el árbol de problemas:** Integrar las causas y los efectos en un sólo cuadro que resume la situación del problema analizado.

3. Análisis de objetivos

- **Graficar el árbol de medios y fines:** Cambiar todas las condiciones negativas del árbol de problemas a condiciones positivas deseadas y viables. Así las causas se transforman en medios en el árbol de objetivos, los que eran efectos se transforman en fines y lo que era el problema central se convierte en el objetivo central o propósito del proyecto.
- **Validar el árbol de medios y fines:** Después se examinan las relaciones entre medios y fines establecidos para garantizar que el esquema de análisis es válido e íntegro. Si en el proceso se determinaron inconsistencias es necesario volver a revisarlo para detectar las fallas que se pudieran haber producido.

En la medida en que las causas estén bien identificadas, los medios estarán y las alternativas serán más acertados para la resolución del problema y obtención de los fines que persiga el proyecto.

4. Selección de la estrategia óptima

En este punto se deben formular acciones para solucionar el problema planteado, para esto se debe utilizar como herramienta el árbol de objetivos (medios) con el fin de buscar de manera creativa, una acción que lo concrete efectivamente en la práctica.

- **Identificación de acciones:** Es un proceso analítico que permite operacionalizar los medios, es decir los que se encuentran en la parte inferior del árbol de objetivos.
- **Postulación de alternativas viables y pertinentes:** Para ello es necesario discriminar entre acciones, esto se hace clasificándolas en dos tipos: Complementarias (son factibles en conjunto y que van a complementar sus aportes a la solución del problema) y Excluyentes.
- Seleccionar la estrategia óptima

5. Elaborar la estructura analítica del proyecto

Con la información obtenida se construye la Estructura Analítica del Proyecto, que consiste en realizar un árbol de objetivos ajustado a la alternativa seleccionada, pero con 4 niveles jerárquicos: fin, propósito, componentes y actividades.

El fin y propósito se toman del árbol de objetivos original, mientras que los componentes y actividades deberán construirse a partir de la información producto de los estudios de viabilidad financiera, económica, técnica, legal y ambiental que se utilizaron para el análisis de alternativas.

6. Resumen narrativo de objetivos y actividades

El propósito es construir la columna de resumen narrativo de la Matriz del Marco Lógico (Tabla 12), la cual sintetiza las actividades del proyecto, los productos que se entregarán, y los resultados de corto, mediano y largo plazo que se esperan lograr en la población objetivo. Este análisis requiere un conocimiento detallado del proyecto, precisando cuál es la relación causal y teórica entre estos niveles.

Matriz del Marco Lógico	
Columna de objetivos	x
Fin	x
Propósito	x
Componentes	x
Actividades	x

Tabla 12. Matriz del marco lógico

7. Indicadores

Los indicadores definen lo escrito en la columna de objetivos de la MML y aparecen a cada nivel de dicha matriz. Describen las metas del proyecto en cada nivel de objetivos: Fin, Propósito o componente esperado. De este modo, se convierten en el punto de referencia y "carta de navegación" para guiar las actividades de gestión/monitoreo y evaluación del proyecto. Los indicadores bien formulados aseguran una buena gestión del proyecto.

La Metodología del Marco Lógico permite la generación de políticas encaminadas a solucionar una problemática que afecte a la sociedad y sirve de base para establecer las acciones necesarias para lograr los objetivos planteados en cada proyecto, sin embargo, la planeación nacional requiere hacer referencia a las metas y objetivos centrales establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo (PND); ya que todas las acciones a seguir deben estar estructuradas en base a él. Dicha planeación constituye una herramienta muy importante para que existan objetivos claros y a su vez las acciones emprendidas conduzcan a la generación y logro de dichos resultados. México cuenta con un PND al que se sujetan obligatoriamente todos los programas de la Administración Pública Federal (APF) y éste constituye el marco de referencia para ubicar el sustento de las acciones de gobierno, por lo tanto, el PND es el documento que sirve de guía para la acción gubernamental.

Uno de los objetivos de este trabajo es conocer la viabilidad de utilizar la metodología desarrollada para el cálculo de la HC como herramienta para la generación de políticas orientadas a mitigar emisiones de GEI en las cadenas de generación de biogás. Por lo tanto, se han analizado como en otros países se han generado políticas exitosas utilizando información que arroja la metodología de la HC para cumplir objetivos nacionales en materia de reducción de emisiones de GEI. Los principales países que han logrado dichos objetivos son Estados Unidos con su Estándar RFS1 y RFS2, la Unión Europea con la metodología de la RED y Reino Unido con su estándar RTFO.

La etapa principal a la cual la metodología desarrollada podría aportar conocimientos y serviría como base para el desarrollo de las etapas siguientes, es la etapa 4, ya que la información obtenida, se considera que podría ser utilizada como lineamiento para que pueda establecerse una política pública que oriente a los generadores y consumidores de energía, vinculados a procesos de digestión anaerobia de aguas residuales, FORSU y cultivos energéticos a que sean utilizados con la intención de la generación de biogás, detectando puntos susceptibles a mejora dentro del proceso.

4.4 Iniciativas gubernamentales para biocombustibles a nivel internacional.

4.4.1. *Directiva 2009/28/CE*

En el 2009 la DIRECTIVA 2009/28/CE del parlamento europeo y del consejo (RED), publicó una de las iniciativas más importantes en materia de sustentabilidad de biocombustibles, donde se establece un marco para fomentar la sustentabilidad nacional, así como la reducción de los GEI, de la energía procedente de biocombustibles mediante un sistema nacional de verificación donde cada miembro debe desarrollar un “esquema voluntario reconocido por la Comisión Europea”. Actualmente existen 19 esquemas voluntarios derivados de esta directiva, los principales son: Certificación Internacional de Sostenibilidad del Carbono (ISCC); Mesa Redonda en Soja Responsable (RTRS por sus siglas en inglés); Mesa Redonda en Biocombustibles Sostenibles (RSB); 2BSvs Sostenibilidad de los Biocombustibles de Biomasa; RED Estándar de Garantía de Sostenibilidad Bioenergética (RBSA); Greenenergy (IDAE, 2009; Glenister David, Nunes Vanda, 2011; J. N. Coelho, et al, 2009).

Esta Directiva detalla los planes de desarrollo necesarios para la introducción y el desarrollo de las fuentes de energía renovables, para el caso de los biocombustibles, se indican criterios de sostenibilidad que deben adoptarse si se desea que el uso de un biocombustible de una fuente determinada contribuya al objetivo de energías renovables de un Estado miembro (Whittaker et al., 2011).

La Directiva 2009/28/CE “Establece un marco relativo al fomento de la energía procedente de fuentes renovables. Fija objetivos nacionales obligatorios en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía y con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el transporte. Además, establece normas relativas a las transferencias estadísticas entre Estados miembros, los proyectos conjuntos entre Estados miembros y con terceros países, las garantías de origen, los procedimientos administrativos, la información y la formación, y el acceso a la red eléctrica para la energía procedente

de fuentes renovables. Define criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos” (Council, 2009).

4.4.1.1 RED (Renewable Energy Directive)

La Directiva RED, es un marco para el fomento de la energía procedente de fuentes renovables. La estrategia planteada por la RED, fue generada en el 2009 y modificada en el 2018. Establece que para que cualquier biocombustible sea considerado como tal, deben presentar una reducción del 35% de GEI con respecto a los combustibles de origen fósil, con posteriores modificaciones se estableció que debe existir una mitigación mínima de:

- 1) El 50 % en el caso de los biocarburantes, biogás consumido en el sector del transporte y en el 2015.
- b) El 60 % en el caso de los biocarburantes, biogás empleado en el sector del transporte y biolíquidos producidos en instalaciones que hayan entrado en funcionamiento desde el 2015 hasta el 2020.
- c) El 65 % en el caso de los biocarburantes, biogás consumido en el sector del transporte y biolíquidos producidos en instalaciones que hayan entrado en funcionamiento a partir del 1 de enero de 2021;
- d) El 70 % como mínimo en el caso de la producción de electricidad, calefacción y refrigeración a partir de combustibles de biomasa de 2021 hasta el 2025, y del 80 % en el caso de las instalaciones que hayan entrado en funcionamiento a partir del 2026.

Para calcular este ahorro se aplican las siguientes formulas:

$$A = \frac{EF - EB}{EF}$$

Donde:

A=Ahorro de GEI

EF= Emisiones del combustible fósil con que se compara.

EB= Emisiones totales del biocarburante.

EB = eec + el + ep + etd + eu – eccs – eccr – eee

eec = Extracción o cultivo de las materias primas el = cambio en el uso de la tierra (incluye el bono e_B de 29 gCO₂/MJ para tierras degradadas)

ep = Emisiones en el proceso

etd = Emisiones de transporte y distribución

eu = Emisiones combustible utilizado

eccs = Emisiones de carbono capturado y almacenado

eccr = Emisiones de carbono capturado y reemplazado

eee = Ahorro de emisiones por excedente de electricidad en cogeneración.

La Directiva de la RED, presenta una serie de características que deben tomarse en cuenta para su implementación (RED, 2009):

- Sólo considera 3 GEI: CO₂, N₂O y CH₄.
- Establece que no se producirán biocombustibles a partir de materias primas provenientes de: Bosques primarios y otras superficies boscosas, Zonas protegidas y Prados o pastizales con una rica biodiversidad.
- Establece que no se producirán biocombustibles a partir de materias primas procedentes de tierras con elevadas reservas de carbono: Humedales, zonas arboladas continuas, tierras con extensión superior a una hectárea con árboles de una altura superior a cinco metros y una cubierta de copas de entre el 10% y el 30%.
- No se producirán a partir de materias primas de tierras que fueron turberas.
- Contiene un apartado de verificación donde establece que los Estados Miembros deben exigir a los operadores cumplir y demostrar los criterios de sostenibilidad. Además, cada estado miembro deberá desarrollar un mecanismo de verificación.
- Presenta varias guías con el objetivo de aclarar los aspectos que deben cumplir en materia de sostenibilidad durante la producción de biocombustibles.

Presenta varios anexos, donde se incluye:

- Objetivos globales nacionales en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final en 2020 (No incluye a México).
- Fórmula de normalización para calcular la electricidad generada en centrales hidroeléctricas e instalaciones eólicas.
- Contenido energético de los combustibles de transporte (incluye al biogás).
- Un apartado relativo a la certificación de los instaladores.
- Normas para calcular el impacto de los biocarburantes, biolíquidos y los combustibles fósiles de referencia en las emisiones de GEI, que a su vez se subdividen en dos categorías: 1) Valores típicos y valores por defecto para los biocarburantes producidos sin emisiones netas de carbono debidas a cambios en el uso del suelo y 2) Valores típicos y valores por defecto estimados para los futuros biocarburantes que no se encontraban o solo se encontraban en cantidades insignificantes en el mercado en enero de 2008, producidos sin emisiones netas de carbono debidas a cambios en el uso del suelo.
- Presenta como calcular el Balance energético de las bombas de calor.

- Presenta la metodología que debe seguirse para el cálculo de reducciones dentro del mismo anexo, incluye todas las consideraciones pertinentes en su redacción.
- Presenta los requisitos mínimos del modelo armonizado para los planes de acción nacionales en materia de energía renovable (consumo energético final previsto, objetivos nacionales sectoriales para 2020, medidas para alcanzar los objetivos y evaluaciones pertinentes).
- Contiene además una herramienta computacional para facilitar el cálculo de la HC de carbono, la llamada “Calcugei”.
- Presenta 13 estándares de certificación, entre los que destacan: Certificación Internacional de Sostenibilidad del Carbono (ISCC), Bonsucro, Mesa Redonda en Soja Responsable (RTRS), Mesa Redonda en Biocombustibles Sostenibles (RSB), 2BSvs Sostenibilidad de los Biocombustibles de Biomasa, RED Estándar de Garantía de Sostenibilidad Bioenergética (RBSA), Greenery (Programa de Verificación de Bioetanol Brasileño)

4.4.2 The Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO)

El RTFO (Renewable Transport Fuel Obligation) es un requisito para los proveedores de combustible de transporte en Reino Unido garanticen que el 5% de todo el combustible se suministre a partir de fuentes renovables sostenibles para 2010 (Whittaker et al., 2011). El RTFO obliga a los consumidores de petróleo, diesel, gas oil o biocombustibles que utilizan 450,000 litros o más, a seguir el estándar, es importante recalcar que los primeros 450 000 litros no se certifican. Los consumidores pueden cumplir con sus obligaciones canjeando “Certificados de Combustible Renovables para Transporte” (RTFC) o pagando por cada litro de combustible para el cual desean "comprar" su obligación.

La obligación de los proveedores sobre qué porcentaje de combustible fósil debe ser sustituido por combustibles sostenibles establecido en el RTFO, se calcula a partir del volumen total de combustible suministrado, multiplicado por el porcentaje de obligación para ese período (tabla 14) y se redondea al litro más cercano. Se considera que el combustible es sostenible sólo si tiene el certificado que se emiten RTFCs.

Año	Cantidad especificada, como parte del combustible fósil, por volumen %.	Importe especificado, como porcentaje del total de combustible, por volumen %.
2019	9.289 %	8.5 %
2020	10.803 %	9.75 %
2021	11.235 %	10.1 %
2022	11.607 %	10.4 %
2023	11.857 %	10.6 %
2024	12.107 %	10.8 %
2025	12.36 %	11 %

Tabla 14. Porcentaje de combustible fósil que debe ser sustituido.

Un aspecto importante de este estándar es que establece un volumen máximo para el uso de biocombustible proveniente de cultivo que sea considerado alimento, comenzando en 4% en 2018-2020 y disminuirá en un año desde 2021 hasta alcanzar 3% al 2026 y 2% por 2032.

Establece también un objetivo específico de 'combustibles de desarrollo', que tiene en cuenta el tipo de combustible, la vía de producción y la materia prima, para incentivar que toda la cadena de producción del biocombustible sea sustentable. Los proveedores deben clasificar su combustible como un combustible fósil, un biocombustible, un biocombustible parcial, un RFNBO, o un combustible que es parte RFNBO, parte no RFNBO, para lo cual en la guía se observa un diagrama de flujo que facilita su clasificación.

La terminación de la sustentabilidad de un combustible, se hace en función del porcentaje de todas las materias primas utilizadas de origen renovable, expresando en unidades de energía. Las materias primas incluyen biomasa y combustibles fósiles, así como cualquier proceso químico que contribuya al combustible. Se debe evidenciar masa y contenido energético de cada materia prima:

$$\text{MJ de combustible renovable} = \frac{\text{MJ totales de materia prima renovable}}{\text{MJ totales de toda la materia prima}} * \text{MJ producidos}$$

Este estándar también incluye a los RFNBO que son combustibles renovables líquidos o gaseosos para el transporte para los cuales ninguno de los contenidos energéticos del combustible proviene de fuentes biológicas. Esto significa que los RFNBO se podrían hacer usando electricidad, calor y frío de la energía eólica, solar, aerotermia, geotérmica o agua.

Respecto al uso de la tierra, cuando las emisiones del CUS son mayores que cero, se debe agregar al valor calculado. Además de informar la intensidad de carbono, se debe especificar si se utilizaron datos reales para: la etapa de cultivo y la cadena de combustible. Permite calcular las emisiones del cultivo de una materia prima para biocombustibles utilizando datos promedio regionales o utilizando datos de medición.

La metodología de cálculo de GEI permite la inclusión de ahorro de emisiones por captura y almacenamiento de carbono (eccc) y ahorro de emisiones por captura y reemplazo de carbono (eccr). La metodología de GEI para el cálculo de la intensidad de carbono de un combustible renovable, de origen no biológico (RFNBO) se calcularán como:

$$\mathbf{E = eec + ep + etd + eu - eccs - eee}$$

Dónde:

E= Emisiones totales por uso de combustible.
eec= Emisiones de extracción o recolección de materias primas.
ep= Emisiones del procesamiento.
etd = Emisiones de transporte y distribución.

eu= Emisiones del combustible en uso.
eccs = Ahorro de emisiones por captura de carbono y almacenamiento geológico.
eee = Ahorro de emisiones por exceso de electricidad de cogeneración.

El agua, CO₂ biogénico, CO₂ atmosférico y CO₂ natural/geotérmico se consideran que tienen cero emisiones de GEI durante el ciclo de vida hasta el proceso de colección de estos materiales

Para la asignación de emisiones, estas se dividen entre: eec + aquellas fracciones de ep, etd y eee e incluyendo el paso del proceso en el que se produce un coproducto. En el caso de combustibles renovables líquidos y gaseosos de origen no biológico, todos los coproductos se tendrán en cuenta a los fines de dicho cálculo, aquellos que tienen un contenido de energía negativo se considera que tienen un contenido de energía de cero para los fines del cálculo.

Establece una sección para calcular las emisiones de GEI debido al cambio en el uso del suelo. El impacto del cambio en el uso de la tierra no es aplicable a los biocombustibles derivados de desechos y residuos no agrícolas.

Las emisiones relacionadas con el cambio en el uso del suelo se deben calcular en función de la diferencia en las reservas de carbono de la tierra entre el uso actual y anterior del suelo, como se muestra a continuación:

$$E_i = (CSR - CSA) * 3.664 * (1/20) * (1/P) - eB$$

Dónde:

E_i= emisiones anuales de GEI derivadas del cambio de uso de suelo (gCO_{2eq}/MJ)
CSR= carbón almacenado asociado con el uso de suelo de referencia.
CSa= carbón almacenado asociado con el uso de suelo actual

P= productividad del cultivo (MJ/ha).
eB= bono de 29 gCO_{2eq}/MJ si el cultivo es obtenido de tierras degradadas que hayan sido restauradas.

Para el estándar RTFO, las metas de mitigación de GEI, son las mismas que las establecidas por la RED, ya que se basan en ellas.

Este estándar, además, incluye un software para facilitar el cálculo de GEI, pero solo incluye biocombustibles líquidos para generación de electricidad y combustibles fósiles. En las cadenas que tiene establecidas, se incluye biodiesel, biometanol, bioetanol y aceite vegetal.

4.4.3. Overview for Renewable Fuel Standard (RFS 2)

En Estados Unidos, la Agencia de Protección Medioambiental aprobó los estándares RFS1 y RFS2 que implementan un marco regulatorio para garantizar la sustentabilidad del combustible utilizado en el transporte que se vende en EUA contenga un volumen mínimo de combustible renovable. EL RFS 1 tiene como objetivo disminuir la dependencia en las importaciones de petróleo extranjero, reducir las emisiones GEI, mejorar la calidad del aire, diversificar el suministro energético del país.

En el 2007 se promulgó una segunda versión del estándar RFS2, la cual obliga a los refinadores nacionales o los importadores de petróleo a usar cierta cantidad de biodiésel en el combustible fósil. Esta versión tuvo un impacto positivo al impulsar la generación de 800 millones de galones en el 2011 de biodiesel (Haer, 2013). (ICCC, 2010). El RFS2 incluye la aplicación de estándares para limitar la emisión de GEI durante el ciclo de vida de los biocombustibles (Haer,2013). Su implementación requiere el análisis de los biocombustibles por el método ASTM D6866 (Beta, 2010). Este estándar posibilita la medición el contenido biogénico de los combustibles y de las emisiones durante la combustión. Pero se utiliza más como una herramienta precisa de monitoreo y verificación para las estrategias de crédito y compensación de carbono.

EL RFS cuenta como base legal para su estándar con la Política energética del 2005, que aborda la producción de energía en los Estados Unidos y con la Ley de independencia y seguridad energética (2007) tiene como objetivos principales lograr independencia y seguridad energética, aumentar la producción de combustibles limpios y renovables, entre otros.

RFS2 clasifica los combustibles renovables de acuerdo con cuatro categorías no exclusivas, basadas en umbrales de reducción de GEI y los tipos de materias primas, y establece requisitos volumétricos para cada uno: Diesel a base de biomasa, Biocombustible celulósico, Biocombustible avanzado (combustible distinto del etanol derivado del almidón de maíz) y Combustible renovable total.

Este programa exige que cualquier combustible renovable debe mitigar mínimo el 20% para ser elegible para un Número de Identificación Renovable (RIN), y al establecer umbrales de reducción más altos para tres de las cuatro categorías de

combustibles que define, el RFS2 promueve combustibles de bajo carbono y biocombustibles de próxima generación.

Para que un combustible califique como un combustible renovable bajo este programa, la EPA debe certificar que mitiga emisiones de GEI en comparación con una línea de base de petróleo de 2005. Las partes obligadas, es decir, los refinadores e importadores de gasolina y diésel, deben cumplir con una obligación de volumen renovable (RVO) para cada tipo de combustible renovable cada año, se determina en función del volumen de gasolina/diésel producido o importado por la parte y los estándares de porcentaje (por volumen) establecidos para las cuatro categorías de combustibles renovables en un año dado, tal cómo se explica a continuación:

- El diésel a base de biomasa debe cumplir con un 50% de reducción de GEI en su CV.
- El biocombustible celulósico debe producirse a partir de celulosa, hemicelulosa o lignina y debe cumplir con un 60% de reducción de GEI en el ciclo de vida.
- El biocombustible avanzado puede producirse a partir de biomasa renovable calificada (excepto almidón de maíz) y debe cumplir con una reducción del 50% de GEI.
- El combustible renovable (generalmente se refiere a etanol del almidón de maíz) debe cumplir con una reducción de GEI del 20% en su CV.

El reglamento define la biomasa renovable para excluir la producción de bosques federales, bosques naturales en tierras no federales, árboles en entornos urbanos, huertos y pastizales Este estándar utiliza como metodología para el cálculo de la mitigación de GEI del combustible renovable, el análisis del ciclo de vida (ACV). El límite del sistema para se extiende "desde el pozo hasta las ruedas" e incluye las emisiones de GEI del cambio indirecto del uso de la tierra.¹

Reino Unido espera que gracias a estos estándares se reduzcan las emisiones anuales de GEI en 138 millones de toneladas métricas (TMM) en 2022 y se reduzca la intensidad de carbono de los combustibles regulados en un 6,5% en relación con su intensidad de carbono en 2009 (ICCC, 2010).

Estas 3 metodologías están vigentes a nivel internacional y su aplicación ha ayudado en el objetivo de mitigación de GEI, además, se encontró que en México existe una NMX basada en el cálculo de la HC cuyo objetivo es la certificación de

¹ Se produce cuando los cultivos destinados a la producción de biocombustibles sustituyen a la producción tradicional de cultivos alimenticios, aumenta la presión sobre la tierra dando lugar a la expansión de tierras agrícolas en tierras con elevadas reservas de carbono (DOF, 2018).

biocombustibles gaseosos. Dicha Norma Mexicana es la NMX-AA-174-SCFI-201, que se describe a continuación.

4.4.4 NMX-AA-174-SCFI-201. Biocombustibles líquidos.

En 2015, en México se publicó la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-174-SCFI-2015 que establece especificaciones y requisitos para la certificación de sustentabilidad ambiental en la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal. Esta Norma Mexicana tiene como objetivo establecer los requisitos y los criterios para obtener la certificación de sustentabilidad ambiental en la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal. Es de cumplimiento voluntario, aplicable en el territorio nacional y aplica a los interesados, ya sean personas físicas o morales, en la sustentabilidad de los procesos de producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal en las fases de producción de biomasa, transporte y su transformación industrial.

Para obtener el certificado de Bioenergéticos líquidos sustentables, conforme a este Proyecto de Norma Mexicana, el Operador debe contar con un Plan de Manejo Ambiental y Social (PMAS).

La NMX-AA-174-SCFI-201, establece que cuando se utilicen residuos y/o subproductos como materia prima, los valores de reducción de GEI, de índice de rendimiento energético y el cumplimiento de indicadores solamente se cuantificará a partir del momento en que cobran carácter de materia prima de producción de bioenergéticos. Además, establece que, para la producción de bioenergéticos que proviene de residuos que de otra manera hubieran sido descompuestos al aire libre, incinerados o dispuestos de forma que se genere contaminación ambiental, su reducción de emisiones GEI se cuantificará al doble de lo que resulte como diferencia con el valor de referencia para los combustibles fósiles sustituidos.

Esta Norma considera dos niveles de certificación: 1) Sustentable, que son aquellos que logran una reducción de GEI de 35 a 50 % con respecto a los valores de referencia para combustibles fósiles. 2) Sustentable Global, que son aquellos que cumplen con una reducción de emisiones mayor al 50 % con respecto a los valores de referencia para combustibles fósiles.

4.3.4.1 Metodología de cálculo de emisiones de GEI anuales establecida dentro de la NMX.

1) Las emisiones totales anuales de GEI en el ciclo de vida de los bioenergéticos líquidos de origen vegetal se calcularán con la siguiente ecuación:

$$ET = \frac{ECUS + EEA}{P} + EEI$$

donde:

ET= Emisiones Totales, t CO_{2eq} / GJ
ECUS= Emisiones por Cambio de Uso de Suelo, t CO_{2eq} / ha
EEA= Emisiones Etapa Agrícola, t CO_{2eq} / ha

EEl= Emisiones en la Etapa Industrial, t CO_{2eq} / GJ.
P= Productividad energética, GJ / ha

2. Las emisiones de GEI serán reportadas en kgCO_{2eq} /GJ de bioenergético, poder calorífico inferior. Los gases a considerar serán CO₂, CH₄ y N₂O, con potenciales respectivos de calentamiento global del más reciente reporte del IPCC.

3. Para la etapa agrícola se debe reportar las emisiones generadas por cualquier Cambio de Uso del Suelo forestal calculándolas con las siguientes ecuaciones:

$$ECUS = ((CPss + CPbs + CPs) - (CAss + CAbs + CAs)) * 3.6667 * 1/20$$

dónde:

ECUS= Emisiones por el Cambio de Uso de Suelo, t CO_{2eq} / ha
CPss= Carbono Previo en la Biomasa viva aérea y subterránea, t C / ha
CPbs= Carbono Previo en la materia orgánica muerta aérea y subterránea, t C / ha

5. DISCUSIÓN

El sector energético es uno de los sectores que generan un mayor impacto en cuanto a emisiones de GEI, principalmente el uso de combustibles fósiles, por lo tanto, es fundamental desacoplar el desarrollo económico de cualquier país de su uso (EREC, 2007).

Uno de los aspectos más importantes discutidos a nivel global es el Cambio Climático ocasionado por el aumento en la concentración de GEI (De Juana et al, 2003) y la importancia de realizar acciones de política en los países para mitigarlo y adaptarse a él. En este contexto, una propuesta para apoyar en la mitigación de GEI es el uso de fuentes renovables de energía, incluido el biogás. Por lo tanto, una de las principales tareas para los responsables políticos es establecer las condiciones y políticas para canalizar el uso de bioenergía hacia un desarrollo sostenible y unilateral (Schubert et al., 2009), que además contribuya a la mitigación de GEI.

En México existe un amplio marco Ambiental regulatorio, en el tema de cambio climático que comprende la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y los instrumentos que de ella derivan. También se han establecido acciones de política para el uso de energías renovables con la finalidad de mitigar emisiones de GEI como es la Ley de Transición Energética y la Estrategia Nacional de Energía 2012-2026 (Gobierno de la república, 2016), sin embargo, la legislación en materia de biogás como fuente de generación de energía no se ha desarrollado todavía, por lo que existen áreas de oportunidad para mejorar los métodos de medición, regulación, sanción y apoyo para la producción de biogás.

La WBGU (Consejo Consultivo Científico para el Cambio Global) recomienda que “solo se deben promover aquellas cadenas de generación de biogás que generen impactos ecológicos y socioeconómicos positivos, que mejoren la eficiencia del uso tradicional de biomasa y se basen en la utilización de residuos y desechos” (Schubert et al., 2009). El objetivo entonces es diseñar un marco regulatorio en materia de fuentes renovables de energía que establezca las condiciones para minimizar los riesgos ambientales potenciales.

Aunada a esta necesidad, actualmente México ha presentado 2 importantes compromisos de mitigación de GEI, así como de generación del 35% de energía limpia en el 2024 y 43% al 2030 (energía eléctrica), así como la sustitución en la industria nacional de combustibles pesados por gas natural, energías limpias y biomasa. Existe, además, un 3 compromiso referente a que México se comprometió a mitigar el 22% de sus emisiones de GEI de manera no condicionada para el año 2030. Es en este punto donde la HC puede resultar útil para determinar las características de las fuentes renovables para que puedan mitigar gases de efecto

invernadero ya que la HC es una herramienta que permite contabilizar emisiones de GEI, además, es muy útil como un indicador que permite identificar todas las fuentes de emisiones de GEI, puntos críticos susceptibles a mejoras dentro del proceso que pudieran traducirse en disminución de costos de operación, aumento de productividad y disminución de impactos ambientales con relación a los combustibles fósiles, lo que facilita observar si cumple con los objetivos establecidos (CEPAL, 2011; ISO, 2018).

Al referirnos al biogás como una fuente renovable de energía con potencial para contribuir a la diversificación de la matriz energética de México, se puede señalar que actualmente existen indicadores claros a nivel internacional que permiten definir de forma cuantitativa los procesos y mejoras necesarias para lograr mayor eficiencia en el proceso de generación de biogás (López et al., 2017), así como las medidas necesarias para lograr una mitigación real de emisiones de GEI (López et al., 2017). Aunado a esto, existe experiencia de otros países sobre cómo utilizar este tipo de información para la generación de iniciativas que incentiven el uso y aprovechamiento de este tipo de tecnología energética, como es el caso de las iniciativas presentadas por Estados Unidos, Reino Unido y la Unión Europea.

Con el objetivo de determinar los lineamientos de política para los cuales este trabajo puede arrojar información útil, se compararon 3 iniciativas a nivel internacional, mencionadas anteriormente, que utilizan la metodología de la HC como base para generar pautas y establecer un marco común en materia de mitigación fijando objetivos nacionales. Con la finalidad de comparar los objetivos propuestos, su base política, principales aportaciones, metodología propuesta y los aspectos relevantes, a continuación, se discute la información más relevante de cada iniciativa (tabla 15):

	RFS 2	RED	RTFO
Año	2007	2001	2008
Lugar	EUA	Unión Europea	Reino Unido
Objetivo	Lograr independencia y seguridad energética, aumentar la producción de combustibles limpios y renovables.	Lograr que al menos el 32% del consumo final bruto de energía de la UE proceda de fuentes renovables para el 2030.	Reducir emisiones de GEI generadas por el uso de combustibles vehiculares.
Mitigación	Este programa exige que cualquier combustible renovable debe	Mitigar GEI en el sector de los biocarburantes, biogás consumido en el sector del	Se basa en la mitigación propuesta por la RED

	mitigar mínimo el 20% para ser elegible para un Número de Identificación Renovable (RIN)	transporte y biolíquidos: a) 50 % en el 2015 b) 60% del 2015-2020. c) 65 % de 2021. Para producción de electricidad, calefacción y refrigeración a partir de biomasa: a) 70 % del 2021 al 2025. b) 80 % a partir del 2026.	
Obligados	Refinadores nacionales e importadores de petróleo.	Estados miembros	Consumidores de 450,000 litros o más
Recompensa	No	1)Biocombustibles a partir de residuos y desechos, con excepción de agrícolas, de acuicultura, pesqueros y forestales. 2)Electricidad, calefacción y refrigeración producidas a partir de FORSU no estará sujetas los criterios de reducción de GEI.	1)Biocombustibles derivados de desechos, (con excepción de la agricultura, acuicultura, pesca y silvicultura) cumplen automáticamente los criterios de uso de la tierra requeridos. 2)Por residuos, cultivos energéticos dedicados y RFNBOs (Duplique las RTFCs por l o kg suministrado)
Base política	Política energética (2005) y la Ley de independencia y seguridad energética (2007).	Marco para las políticas de clima y energía en 2030. Informe de situación sobre la energía renovable»	
Combustibles obligados	Diésel a base de biomasa,		Petróleo, diésel, gas oil o biocombustibles

	Biocombustible celulósico, Biocombustible avanzado y Combustible renovable total.		
Cumplimiento	Exige que cualquier combustible renovable debe mitigar mínimo el 20% para ser elegible para un Número de Identificación Renovable (RIN),	Especificaciones en la metodología	Certificados de Combustible Renovables para Transporte” (RTFC).
% permitido Proveniente de cultivos comestibles	No será superior al 1% de la cuota de dichos combustibles sobre el consumo final de energía en los sectores del transporte , con un máximo del 7 % del consumo final.	Menor al 7%, a partir del 2023 se irá reduciendo anualmente hasta llegar al 0%.	4% en 2018-2020 y disminuirá en un año desde 2021 hasta alcanzar 3% al 2026 y 2% por 2032.
Metodología para cálculo de emisiones de Uso de la tierra	Sí.	Sí. Incluye las emisiones de GEI del cambio indirecto del uso de la tierra.	Sí. Deben demostrar su cumplimiento.
Asignaciones	Criterio energético	Criterio energético	Criterio energético
Metodología descrita para el calculo de GEI.	Sí	Sí	Sí
Software		Biograce	Carbon calculator

Tabla 14. Comparación de iniciativas de Mitigación de GEI. Elaboración propia.

A partir de la información analizada y su posterior recopilación en un cuadro comparativo, es posible mencionar algunos aspectos de importancia: El primero es que las 3 iniciativas analizadas, utilizan la HC como herramienta para contabilizar sus emisiones y posteriormente utilizan la información obtenida para certificar

combustibles sustentables para el sector transporte, a aquellas cadenas que presenten mitigación con respecto a los combustibles fósiles comprables. Además, con base en la HC establecen objetivos fijos de mitigación a corto, mediano y largo plazo, que contribuyan con los objetivos nacionales.

De igual forma, proponen que debe resaltarse la importancia de la inclusión de la etapa agrícola, cómo ya se mencionó anteriormente, ya que esta etapa tiene un impacto importante en la generación de biogás y además establecen como una acción fundamental disminuir el consumo de materia prima que pueda ser considerada alimento, con el objetivo de lograr un 2% como máximo para la RTFO y un uso nulo para la RED, esta limitación es con la finalidad de asegurar que no exista competencia por parte del sector energético con el sector de producción de alimentos y que este no disminuya la seguridad alimentaria del país donde sea generado el biogás (González Merino & Castañeda Zavala, 2008).

En esta tesis, se evaluó una planta cuya materia prima es un cultivo energético y a pesar de que se obtienen resultados favorables de mitigación para los 3 usos finales, ya que para el uso final como generación de calor se obtiene una huella de 67 gCO_{2eq}/MJ, comparada con la del gas natural que es de 72 gCO_{2eq}/MJ. Para generación eléctrica se obtiene una HC de 333 gCO_{2eq}/kWh, comparada con la HC asociada a la Red Eléctrica Mexicana que es de 594 gCO_{2eq}/kWh y para el uso en el sector transporte la HC es de 61 gCO_{2eq}/MJ, comparada con la de la gasolina, que es de 74 gCO_{2eq}/MJ. Sin embargo, existe un estudio muy interesante sobre el vínculo entre biocombustibles y seguridad alimentaria, que habla sobre el uso de productos agrícolas que pueden ser considerados alimentos o bien desplazar tierras para la producción de alimentos para destinarlas a cultivos energéticos. La preocupación tiene su base en el año 2006, en el cual se observó un aumento en los precios de los principales granos, especialmente el maíz, y a pesar de que dicho aumento en los precios no puede ser únicamente asociado por el crecimiento en la producción de biocombustibles, se observó que en el año 2007, aumento a casi 40 millones de toneladas la producción de maíz a nivel mundial, y el 75% de la producción de esta materia prima, fue destinada para la producción de etanol (González Merino & Castañeda Zavala, 2008). Por lo tanto, es de vital importancia analizar las ventajas y desventajas que tiene el uso de cultivos energéticos, así como priorizar los usos finales que se le puedan dar a los mismos.

Otro aspecto destacable dentro del análisis, es que las 3 iniciativas internacionales incentivan el uso de residuos como materia prima para la generación de biocombustibles, ya que para el caso de la iniciativa de la RED, menciona que los biocombustibles producidos a partir de residuos y desechos, sólo deben cumplir los criterios de reducción de las emisiones de GEI y además, la electricidad, calefacción y refrigeración producidas a partir de FORSU no estará sujetas a los criterios de reducción de las emisiones de GEI. Para el caso de la iniciativa RTFO, menciona

que, para los biocombustibles derivados de desechos, residuos automáticamente cumplen los criterios de uso de la tierra requeridos y, además, se duplican los créditos al sistema por l/kg suministrado a partir de residuos. En países industrializados, la preferencia por el uso de residuos como materia prima, puede apoyarse haciendo menos atractivos los rellenos por medio de tarifas más elevadas o estándares más estrictos. Una mayor promoción de los residuos para su uso como fuentes de energía no solo contribuye a aprovechar el potencial no utilizado, sino también a redirigir los flujos de materiales de los usos existentes, especialmente el procesamiento y la recuperación de materiales (Schubert et al., 2009).

Para la utilización de residuos debería garantizarse que no se produzcan efectos de desplazamiento, es decir, que el desvío de los desechos no desencadene carencias en algún uso previo que pudiera haberse otorgado anteriormente (Schubert et al., 2009).

La principal ventaja de aprovechar residuos para la generación de energía útil se basa en que no se les puede asignar una carga ambiental previa (contrario a los cultivos energéticos), lo que proporciona una ventaja competitiva a la obtención de energía a partir de residuos. Aun cuando actualmente existe una discusión en la comunidad científica sobre si dicho supuesto es cierto, resulta complicado asociar una carga ambiental de GEI previa a los sustratos analizados por este trabajo. “Las fuentes de energía derivadas de desechos y residuos biogénicos son más propicias para lograr la mitigación del cambio climático que los cultivos energéticos, por lo tanto, deben priorizarse para su uso en bioenergía” (Schubert et al., 2009).

Además de las 3 iniciativas mencionada, es importante recapitular que en México se desarrolló la NMX-AA-174-SCFI-201 para la certificación de biocombustibles líquidos provenientes de biomasa vegetal, en la cual también se utiliza como metodología para el cálculo de las emisiones de GEI, la HC, siendo un claro ejemplo de cómo en nuestro país la información obtenida en esta investigación serviría como herramienta para la generación de políticas. La NMX presenta un criterio sobre la eficacia de los biocombustibles para sustituir energía fósil, el cual es calculado por medio del índice de retorno energético. “Este índice debe permitir que sólo se puedan certificar combustibles que entregan más energía renovable que la energía fósil consumida en producirlos” (García Bustamante & Cerutti Masera, 2016). En esta NMX el uso de residuos también es incentivado, ya que solamente cuantifican emisiones de GEI a partir del momento en que sean materia prima del proceso y aquellos bioenergéticos que provengan de residuos que de otra manera hubieran sido descompuestos al aire libre, incinerados o dispuestos de forma que se generen emisiones de GEI, la reducción de emisiones GEI se cuantificará al doble de lo que resulte como diferencia con el valor de referencia para los combustibles fósiles sustituidos.

Aunado a esta NMX y a que, como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos del proyecto es conocer si la información generada puede servir como base para la generación de lineamientos de políticas públicas, es importante mencionar que en existe una metodología que sirve como base para la generación de políticas, esta metodología es la Metodología del Marco Lógico la cual es una herramienta para facilitar el proceso de conceptualización, diseño, ejecución y evaluación de proyectos. Esta metodología, como se mencionó anteriormente, consta de 7 etapas, las 3 primeras etapas consisten en identificar y definir el problema, seguido de un análisis de involucrados y análisis de objetivos, pueden completarse con la información necesaria a recabar para el cálculo de la HC. La 4 etapa, que consiste en la generación de acciones e identificación de alternativas, es la etapa principal a la cual la metodología desarrollada en este trabajo podría aportar mayores conocimientos y serviría como base para el desarrollo de las etapas siguientes, ya que la información obtenida hasta el momento, se considera que podría ser utilizada como lineamiento para que pueda establecerse una política pública que oriente a los generadores y consumidores de energía, vinculados a procesos de digestión anaerobia de aguas residuales, FORSU y cultivos energéticos a que sean utilizados con la intención de la generación de biogás, detectando puntos susceptibles a mejora dentro del proceso.

Analizando lo anterior, es factible que la metodología desarrollada en el proyecto sobre cálculo de HC pueda utilizarse para generación de información útil para la política en materia de mitigación de GEI por tecnologías energéticas en términos de cuantificar la mitigación, tal y como se ha hecho en otros países. De igual forma la metodología permite identificar aspectos concretos a tomar en cuenta por las tecnologías de producción y aplicación de biogás, donde a partir de los resultados se identificó la importancia de atender al control y mitigación de emisiones en 4 parámetros que presentan una mayor sensibilidad respecto al resultado: almacén del digestato, porcentaje de fugas de CH₄ durante la digestión anaerobia, rendimiento de producción de biogás y tecnología empleada para la obtención de energía. Los resultados obtenidos indican que la fase de almacén de digestato tiene una importante contribución en 2 de las 3 cadenas de generación de biogás evaluadas, por lo que sería beneficioso para el resultado final de la HC de cada cadena realizar un monitoreo de las emisiones a lo largo de la cadena de producción con la finalidad de que los impactos para esta categoría disminuyan considerablemente o almacenarlo de forma cerrada y bajo condiciones controladas.

Los resultados también muestran el alto impacto en términos de emisiones de GEI que tienen las emisiones fugitivas de CH₄ producidas durante la digestión anaerobia. En el trabajo se consideraron fugas de un 2% de la generación de biogás en cada planta, sin embargo, existen informes que mencionan que llegan a ser de entre 2-10% de las emisiones totales de CH₄ (Dumont et al., 2013; Flesch et al.,

2011; Yoshida et al., 2014). Este aumento, para el caso de la planta de FORSU para generación de electricidad, de presentar una HC de 486 gCO_{2eq}/kWh, al considerar emisiones fugitivas del 9%, casi el máximo de las reportadas, dicha HC aumentaría hasta 781 gCO_{2eq}/kWh, lo que la convertiría en una cadena que no presenta mitigación de GEI, al contrario, su HC sería mucho más elevada que la del combustible fósil asociado. De esta forma las fugas de biogás deben considerarse en cualquier instrumento de cálculo de mitigación y deberían minimizarse en todas las plantas para la generación de energía.

Los resultados muestran también el impacto que tiene la aplicación final de la energía (por ejemplo, si es para calor, electricidad o como combustible en los vehículos ya que este último considera etapas adicionales de proceso como una compresión del biogás) en términos de emisiones, así como la importancia de la tecnología empleada para la obtención de energía. Como se puede apreciar en los resultados la etapa de producción de electricidad tiene un impacto del 19% para la cadena de FORSU, 22% para la cadena de agua residual y 30% para la cadena de cultivo energético.

Estos podrían ser algunas alternativas que establecidas como un lineamiento de política pública podrían favorecer la mitigación de GEI de la generación y uso de biogás, sin embargo, es necesario incluir en dichos análisis de sustentabilidad, otras dimensiones e impactos ambientales que pudieran generarse, ya que se evaluó únicamente la HC, sin embargo, existen otros aspectos que son importantes considerar para evaluar la viabilidad y conveniencia de este tipo de prácticas, como es la Toxicidad Humana, Acidificación, uso de suelo, huella hídrica, etc. (IHOBE, 2009)

De acuerdo a los resultados de nuestros estudios de caso observamos que, si se utiliza el método de créditos, las emisiones al sistema de producción de biogás (incluyendo únicamente el digestato) resultan en un mayor beneficio en términos de mitigación. Esto da pie a enfatizar la visualización de estos sistemas de biogás como sistemas integrados de varios productos y no sólo para generación únicamente de energía. En nuestro caso sólo analizamos los lodos como sustituto de fertilizante de origen fósil. Existen algunos estudios que añaden créditos al sistema para incluir la multifuncionalidad de la producción de biogás, en los cuales se ha encontrado que los impactos ambientales evitados por la sustitución de productos origen fósil por coproductos de los sistemas son mayores que los ocasionados por la generación de biogás, por lo que su HC es menor y en algunas ocasiones negativa (Ardolino et al., 2018). Estas inclusiones permiten extender los límites de sistema para incluir las alternativas de producción ya que la ejecución de cadenas de generación de biogás en México podría resultar favorecedor para mitigar impactos ambientales desde una

perspectiva sistémica, que incluya no solo la generación de energía como fin, sino que además se incluya el tratamiento a residuos y la sustitución de productos. Es primordial mencionar que los resultados obtenidos en esta investigación, al añadir créditos al sistema, dependen fundamentalmente de la elección de productos que sean considerados como sustituidos de productos de origen fósil, así como la participación de los combustibles fósiles en la matriz energética mexicana y en la producción de materiales agrícolas. En este proyecto, como se mencionó anteriormente, se incluyen los créditos por las emisiones evitadas por la generación de energía eléctrica y por la utilización de gas natural, así como las emisiones evitadas por utilizar el digestato como fertilizante, lo que da “puntos” a cada una de las cadenas, haciéndolas ver como cadenas cuya mitigación es más elevada respecto a los combustibles fósiles. Por ejemplo, para la cadena de generación de electricidad a partir de FORSU, la huella de carbono utilizando como criterio la asignación energética es de 451 gCO_{2eq}/MJ, al incluir créditos al sistema por la sustitución de fertilizante de origen fósil más la generación de energía, el resultado es mucho más favorecedor en términos de mitigación obteniéndose un total de -277 gCO_{2eq}/MJ.

A partir de la aplicación del método de créditos se observa la conveniencia de considerar a la generación de biogás, más allá de sólo generación de energía sino a partir de una evaluación que permita tener una mejor visión de sus méritos ambientales como una oportunidad de generar nuevos productos y de tratar un residuo que representaría un impacto ambiental o que requerirían de tratamientos o disposición. quede esta forma la generación de biogás es un tema transversal que involucra no solo el sector energético, de transporte y seguridad, sino que además debiera incluir otros aspectos ambientales (como el tratamiento de residuos) o al sector agrícola. De esta forma es necesario explorar lo otros beneficios ambientales que presenta la generación de biogás, por ejemplo, al usar los residuos como materia prima: se reducen las consecuencias de la inexistencia de soluciones adecuadas y eficientes para la gestión de los residuos que potencian el incremento de los riesgos e impactos negativos que pueden causar al ambiente y a la salud de las personas (Correa Cortés, Santos Herrero, & Gómez Moya, 2012). El problema sanitario por la mala disposición de residuos, incide en el riesgo epidemiológico que representa la acumulación y vertimiento incontrolado de excrementos, y además existe riesgo de inflamabilidad (por su contenido pueden favorecer o causar fácilmente un incendio); proliferación de moscas, roedores, bacterias y otros animales y microorganismos causantes de enfermedad (PROFEPA, 2010). Aunado a esto, también existe degradación de la calidad del aire debido al humo proveniente de la quema abierta, polvo de una inadecuada contención, recolección, descarga al

aire libre y gases generados por la descomposición de desechos en un botadero abierto o relleno sanitario.

Lo descrito con anterioridad tiene implicaciones en términos de que las políticas para mitigación de GEI deberán estar acordes a políticas de manejo de residuos por lo menos en lo referente a cadenas de generación de biogás y debería haber coherencia entre la aplicación y uso de las mismas. Dicha coherencia debiera visualizarse como la llamada coherencia horizontal, la cual “alude a la coherencia o alineación entre diferentes políticas públicas de un ente gubernamental respecto de una visión de desarrollo compartida, de forma que las diferentes políticas incorporen y contribuyan a la promoción de los procesos de desarrollo” (Millán, Santander, Aguirre, & Garrido, 2012)

La generación de biogás en México, evaluada mediante metodologías como la propuesta en este trabajo basadas en la HC, podría contribuir en un porcentaje a alcanzar las metas de mitigación, siempre y cuando se tomen en cuenta los criterios y lineamientos establecidos que permitan su correcta generación y aprovechamiento (Provencio, 2005).

6.CONCLUSIONES

La Huella de Carbono es una metodología que permite identificar y contabilizar emisiones de GEI dentro del sistema de generación de biogás, detectar puntos críticos susceptibles de mejoras, así como conocer el potencial de mitigación de este tipo tecnologías al compararlo con combustibles fósiles y que, además, los resultados obtenidos sean claros, transparentes y reproducibles. Para la aplicación de la HC como base para la generación de lineamientos de política, deben considerarse ciertos aspectos, el primero es que las decisiones metodológicas deben expresar claramente y debería existir coherencia entre la información y los resultados obtenidos. Otro aspecto importante es que los resultados obtenidos para cualquier cadena de generación de biogás en materia de mitigación de GEI, pueden ser favorecedores o no dependiendo en gran medida de las características de las cadenas de producción y uso, del combustible fósil contra el cual se comparan o al cual sustituirían, así como de la aplicación que se le dé al mismo.

En esta tesis, en términos generales, a partir de los tres estudios de caso se observan resultados mixtos en cuanto a mitigación para la generación eléctrica con biogás con respecto a la energía de la Red Mexicana, no obstante en los tres casos analizados se registra una mitigación si se compara con las emisiones de la generación eléctrica con carbón mineral.. En cambio, cuando se considera con un uso final térmico, se observó mitigación únicamente en la cadena de generación a partir de cultivo energético, sin embargo, como se mencionó anteriormente sería importante evaluar los impactos negativos que tiene el uso de Tierras destinadas a la producción de alimentos para la generación de energía. Para la cadena de FORSU el mayor impacto se debe a las fugas en el biodigestor, por lo que es necesario mitigarlas para disminuir la HC y así contribuir a los objetivos de mitigación de GEI del país. Para el caso de aguas residuales, el mayor impacto es en el tratamiento secundario, en esta cadena se observa que existen equipos cuyo tiempo de funcionamiento es innecesario.

La mitigación de GEI depende de varios factores, principalmente se encontró que son particularmente importantes 4 parámetros que presentan una mayor sensibilidad respecto al resultado y en los cuales una mínima modificación tiene un gran impacto, dichos parámetros son: almacén del digestato, porcentaje de fugas de CH₄ durante la digestión anaerobia, rendimiento de producción de biogás y tecnología empleada para la generación de energía. Por lo que, de establecerse alguna política con la información obtenida, sería fundamental atender a la disminución de emisiones en los 4 parámetros mencionados con anterioridad, con la finalidad de mitigar su contribución en cada una de ellas, al mismo tiempo que se disminuye su consume energético y se aumenta la eficiencia de generación de

biogás. Estas modificaciones, colocarían este tipo de tecnologías en un panorama mucho más viable en términos de mitigación de GEI. Es por esto que en este proyecto se propone un método con pasos establecidos con la finalidad de generar información confiable.

Es importante resaltar que la HC contabiliza únicamente las emisiones de GEI, excluyendo otro tipo de impactos ambientales potenciales que pudieran generarse por dichas cadenas y no permite extender los límites de sistema para incluir las alternativas de producción. Los resultados de la tesis señalan que la ejecución de cadenas de generación de biogás en México podría resultar favorecedor para mitigar impactos ambientales desde una perspectiva sistémica, que incluya no solo la generación de energía como fin, sino que además se incluya el tratamiento a residuos y la sustitución de productos, lo cual se sugiere partir de la aplicación del criterio de créditos de emisiones en el método de huella de carbono. De esta forma las políticas para la inclusión de biogás en el sistema energético deberán estar acordes a políticas de mitigación de GEI en el sector energético pero también en las políticas de manejo de residuos y debería haber coherencia entre la aplicación y uso de las mismas.

Una vez concluida esta investigación se comprueba que la hipótesis establecida es cierta, comprobándose que, mediante la generación y aplicación de una metodología para el cálculo de la Huella de Carbono de biocombustibles gaseosos, es posible generar lineamientos de política pública para la inserción de tecnologías de bioenergía bajas en emisiones de carbono en el sistema energético mexicano.

Lineamientos a considerar:

1. Utilizar una metodología clara, transparente y coherente con el país en el cual se le aplica.
2. Prestar atención a 4 parámetros que presentan una mayor sensibilidad respecto al resultado: almacén del digestato, porcentaje de fugas de CH₄ durante la digestión anaerobia, rendimiento de producción de biogás y tecnología empleada para la generación de energía.
3. Detallar contra que combustible fósil son comparados los resultados para conocer si existe mitigación.
4. Tener una perspectiva sistémica de la generación de biogás que incluya no sólo la generación de energía, sino, además, el tratamiento a residuos y la sustitución de productos que podría resultar favorecedor para mitigar otro tipo de impactos ambientales.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- Aguilar, G., Campos, A., & Avila, A. (2013). *Estudio de Análisis de Ciclo Vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de polietilen tereftalato (PET) en la fase de pos-consumo*. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416326/2013_CGCSA_Estudio_de_Analisis_de_Ciclo_de_Vida_de_Envases_de_Bebidas_de_Polietilen_Tereftalato_en_la_Fase_de_Pos-Consumo.pdf
- Ardolino, F., Parrillo, F., & Arena, U. (2018). Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 174, 462–476.
- Boulamanti, A. K., Donida Maglio, S., Giuntoli, J., & Agostini, A. (2013). Influence of different practices on biogas sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 53(Supplement C), 149–161.
- Carbon Trust and Defra. (2008). *Guide to PAS 2050 How to assess the* (1st ed.). Reino Unido.
- CDHCU. (2016). Ley General de Cambio Climático. *Dof 06-06-2012*, 1–44. Retrieved from file:///Users/Jordi/Documents/1.Articles/Mexican Government/Mexican Law on Climate Change 2012_lgcc.pdf
- CEPAL, C. E. para A. L. y el C. (2011). *Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina*. Retrieved from https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37288/Metodolog%EDas_calculo_HC_AL.pdf;jsessionid=5E9AA90FB2AAC34D60DA5642750BE182?sequence=1
- Correa Cortés, Y., Santos Herrero, R., & Gómez Moya, L. (2012). La problemática de los residuos sólidos y su gestión. La Habana. Cuba.

- Corzo, J. (2013). *Diseño de Políticas Públicas* (IEXE). México, México.
- Cuadros, S. (2007). Módulo: Contaminación de Residuos. *EOI*, 70. Retrieved from http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45732/componente45730.pdf
- Cuatecontzi, D., & Gasca, J. (2007). Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Retrieved June 16, 2019, from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/dick.html>
- Curran, M. (2012). *Life Cycle Assessment Handbook*. *Life Cycle Assessment Handbook*. <https://doi.org/10.1002/9781118528372>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527621705>
- Dumont, M., Luning, L., Yildiz, I., & Koop, K. (2013). *The biogas handbook* (IEA Bioenergy). Retrieved from www.woodheadpublishing.com
- E. Campos, A. Bonmatí, M.R. Teira, X. F. (2001). APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LODOS, (November).
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Shardul, A., Alexeyevich Bashmakov, I. G. B. (Argentina), Broome, J., ... Brunner, S. (2014). CAMBIO CLIMÁTICO 2014 Mitigación del cambio climático. *CAMBIO CLIMÁTICO 2014 Mitigación Del Cambio Climático*, 7–10. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- European Climate Foundation (ECF), World Energy Council (WEC), Cambridge Judge Business School (CJBS), & Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL). (2014). Cambio Climático : Implicaciones para el Sector Energético. Hallazgos claves del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático., 16. Retrieved from <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/06/Publicacion-Cambio-Climatico-implicaciones-para-el-sector-energetico-IPCCC-AR5.pdf>
- F. M. Vanek, L. D. Albright, L. T. A. (2012). *Energy systems engineering: evaluation and implementation*.
- FAO. (2008). *El Estado Mundial de la agricultura y la alimentación*.
- Farrell, A. E. (2006). Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. *Science*, 311(5760), 506–508. <https://doi.org/10.1126/science.1121416>
- Fernández, L., Montiel, J., Millán, A., & Badillo Jesús. (2012). PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE MICROALGAS. *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 8, 101–115. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/461/46125177011.pdf>
- Ferrer, Uggetti, Poggio, Davide, V. (2017). Producción de biogás a partir de residuos orgánicos en biodigestores de bajo coste. *ResearchGate*, (October 2017), 8.
- Flesch, T. K., Desjardins, R. L., & Worth, D. (2011). Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.009>
- Fusi, A., Bacenetti, J., Fiala, M., & Azapagic, A. (2016). Life Cycle Environmental Impacts of Electricity from Biogas Produced by Anaerobic Digestion. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 4, 26. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00026>

- Galindo, L. M., & Caballero, K. (2010). La economía del Cambio Climático en México: algunas reflexiones. *Gaceta de Economía*, 16(Costos económicos del cambio climático para México), 85–113.
- García Bustamante, C., & Cerutti Masera, O. (2016). *Estado del Arte de la*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3556.2321>
- García, C. A., & Masera, O. (2016). Sustentabilidad y políticas públicas de la bioenergía. In C. A. García & O. Masera (Eds.), *Estado del Arte de la Bioenergía en México* (pp. 64–80). México: Imagia.
- González Merino, A., & Castañeda Zavala, Y. (2008). Biocombustibles, biotecnología y alimentos. Impactos sociales para México. *Argumentos (México, D.F.)*, 21(57), 55–83. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952008000200004
- Hoefnagels, R., Smeets, E., & Faaij, A. (2010). Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1661–1694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.02.014>
- ICCC, I. council on clean transportation. (2010). *U.S. EPA Renewable Fuel Standard 2 Final Rule Summary*. Retrieved from www.theicct.org
- IEA. (2018). *Global Energy and CO2 Status Report*. Retrieved from <https://webstore.iea.org/global-energy-co2-status-report-2017>
- IHOBE. (2009). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y HUELLA DE CARBONO*. Bilbao. Retrieved from http://www.comunidadism.es/wp-content/uploads/downloads/2012/10/PUB-2009-033-f-C-001_analisis-ACV-y-huella-de-carbonoV2CAST.pdf
- INECC. (2015). *COMPROMISOS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PERIODO 2020-2030 MÉXICO*. México. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162974/2015_indc_esp.pdf
- INECC. (2018). Efectos del cambio climático. Retrieved July 20, 2019, from <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/efectos-del-cambio-climatico>
- INECC, & SEMARNAT. (2015). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero*.
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- ISO, O. I. de N. (2018). ISO 14067:2018. Retrieved June 16, 2019, from <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:ts:14067:ed-1:v1:es>
- Jiménez, W. (2012). El concepto de política y sus implicaciones en la ética pública: reflexiones a partir de Carl Schmitt y Norbert Lechner. *CLAD Reforma y Democracia*, Num 53, 215–238.
- Limón Macías, J. G. (2013). Tratamiento De Aguas Residuales , ¿ Problema O Recurso ? *Los Lodos de Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, ¿problema o Recurso?*, 45.
- Liu, T., Wang, Q., & Su, B. (2016). A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.050>
- López, E., Ramírez, L., Gomez, C., & Morgan, J. M. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas*

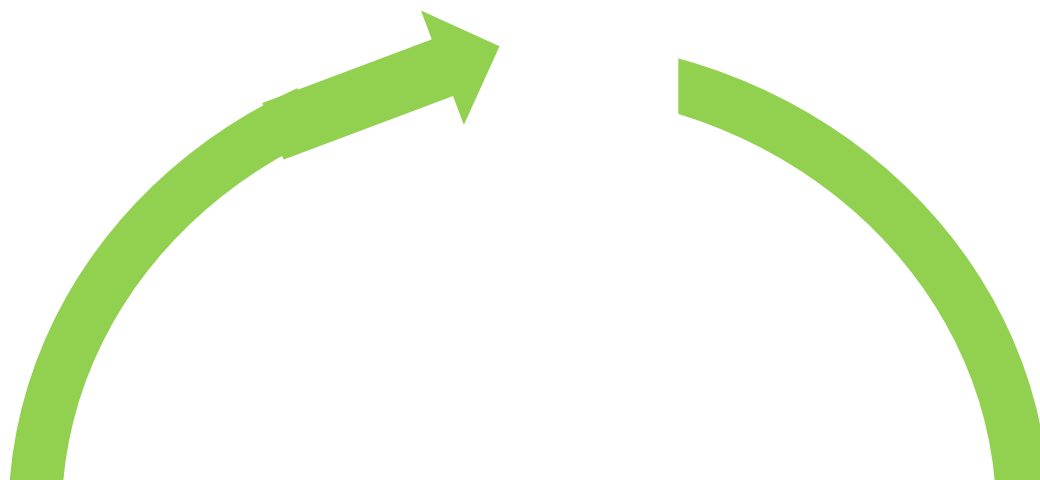
- residuales*. México. Retrieved from <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2017/10/guia-lodos2017-dig.pdf>
- Millán, N., Santander, G., Aguirre, P., & Garrido, A. (2012). La coherencia de políticas para el desarrollo en España. Mecanismos, actores y procesos. *Architectural Review*, (1384), 22–26.
- Moran, D., & Kanemoto, K. (2017). Supply Chains, 1(7491), 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41559-016-0023>
- Pagés, C., & Arshad, H. (2014). SBB: Catálogo de productos 2014.
- Pergua, C., & Castillo, M. (2011). *ESTUDIO SOBRE LA HUELLA DE CARBONO EN ARAGÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO*. Aragon. Retrieved from <https://www.aragon.es/documents/20127/674325/671-HC-ARAGON-Estudio.pdf/9ddaf950-bcd0-6de6-de58-4301de83dfc6>
- Peters, G., & Wats, F. (2005). Análisis de Políticas Públicas. Granada, España.
- PROFEPA. (2010). PROFEPA 2010. Retrieved from http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1370/1/mx/control_de_residuos_peligrosos.html
- Rodriguez, M. (2002). *Las políticas ambientales*. Retrieved from <http://www.manuelrodriguezbecerra.org/bajar/gestion/capitulo7.pdf>
- Sánchez, F., & Vizcón, R. (2017). APLICACIONES INDUSTRIALES La Codigestión de Residuos Orgánicos : una contribución energética , ambiental y de salud humana The Organic Waste Codigestion : an energy , environmental and human health. *Revista de Ingeniería Energética*, XXXVIII, 213–223.
- Schubert, R., Schellnhuber, H. J., Buchmann, N., Epiney, A., Griebshammer, R., Kulesa, M., ... Schmid, J. (2009). *Future bioenergy and sustainable land use. Future Bioenergy and Sustainable Land Use*. <https://doi.org/10.4324/9781849774505>
- SENER. (2018). *Balance Nacional de Energía. Secretaría de Energía, Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. México*.
- Sinden, G. (2009). The contribution of PAS 2050 to the evolution of international greenhouse gas emission standards. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(3), 195–203. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0079-3>
- Singh, R., & Kumar, S. (2017). *Green Technologies and Environmental Sustainability*. [https://doi.org/DOI 10.1007/978-3-319-50654-8](https://doi.org/DOI%2010.1007/978-3-319-50654-8)
- Souza, J., & Schaeffer, L. (2013). Sistema de compresión de biogás y biometano. *Informacion Tecnologica*, 24(6), 3–8. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600002>
- Teske, S., Zervos, A., & Schafer, O. (2007). Revolucion energética: Perspectiva Mundial de la Energía Renovable. *Green Peace, European Renewable Energy Council (EREC)*, 1–86. Retrieved from http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/cambio_climatico/revolucion-energetica-persp.pdf
- The British Standards Institution. (2011). PUBLICLY AVAILABLE SPECIFICATION PAS 2050: 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. *System*, 1–45. [https://doi.org/978 0 580](https://doi.org/978%20580)

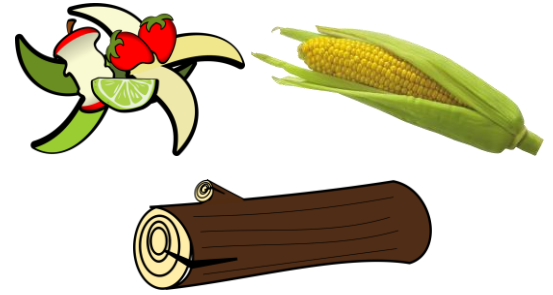
71382 8

- Timilsina, G. R., & Shrestha, A. (2011). How much hope should we have for biofuels? *Energy*, 36(4), 2055–2069.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.023>
- Uriberto, E. (2015). *El Cambio Climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. Santiago.
- Varnero, T. (2011). *Manual de biogás*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Weidema, B., Hermansen, J., Kristensen, T., & Halberg, N. (2008). *Environmental Improvement Potentials of Meat and Dairy Products*. *SciencesNew York* (Vol. 23491). <https://doi.org/10.2791/38863>
- Welsh, C., García, T., & Ochoa, C. (2016). Propuesta de una guía local para la mitigación ante el cambio climático : Inventario de GEI y acciones mínimas, 69–84.
- Whittaker, C., McManus, M. C., & Hammond, G. P. (2011). Greenhouse gas reporting for biofuels: A comparison between the RED, RTFO and PAS2050 methodologies. *Energy Policy*, 39(10), 5950–5960.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.054>
- Yoshida, H., Mønster, J., & Scheutz, C. (2014). Plant-integrated measurement of greenhouse gas emissions from a municipal wastewater treatment plant. *Water Research*, 61, 108–118.
<https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2014.05.014>

8. ANEXO 1.

Metodología para el Cálculo de la Huella de Carbono de Biocombustibles gaseosos en México.





Biocombustibles



Introducción.

Según datos de la Secretaría de Energía (SENER), en el 2016 el consumo final de energía en México fue 9,140.19 PJ, donde los combustibles fósiles representan el 86.8% a la producción de energía primaria, 7.1% menor respecto a lo observado en 2015. La producción de fuentes no fósiles de energía primaria aumentó su participación, pasando de 9.3% a 9.9% de 2015 a 2016 (SENER, 2016). Sin embargo, sigue existiendo una alta dependencia a los combustibles fósiles, razón suficiente para buscar fuentes energéticas alternativas, sin embargo, la razón que cobra cada vez más fuerza tiene que ver con evitar los impactos negativos del calentamiento global, el cual tiene como causa el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) (De Juana et al, 2003).

El sector energético es el que genera un mayor impacto en cuanto a emisiones de GEI, por lo cual es indispensable disminuir su huella de carbono (SENER, 2006). Es por eso necesaria la búsqueda de fuentes de energía alternativa que puedan ofrecer una solución ante esta problemática. En este contexto, el uso de biocombustibles como fuente de energía renovable presenta importantes ventajas para el país. Sin embargo, a pesar de las múltiples ventajas de los biocombustibles, se ha cuestionado el impacto ambiental que se genera durante su ciclo de vida, principalmente en cuanto a la **huella de carbono** se refiere. La huella de carbono contabiliza “**la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto**” (Carbon Trust, 2008).

Es por esto que en los últimos años han existido una serie de propuestas metodologías para estimar la huella de carbono de productos y servicios, cada una de estas propuestas son distintas, por lo tanto, generan resultados distintos al utilizar diferentes criterios de contabilización y factores propios del país en el cual se generan. Debido a esto se propone esta nueva metodología robusta adaptada a biocombustibles gaseosos, que tome como base criterios específicos de México, con la finalidad de homogeneizar los cálculos y transparentarlos, asegurando una efectiva reducción de GEI durante el ciclo de vida de biocombustibles gaseosos.

La presente metodología ha sido desarrollada por..... dirigida a evaluar la huella de carbono asociada al ciclo de vida de biocombustibles gaseosos en México, basándose en el análisis de ciclo de vida y la metodología PAS 2050 para identificar las oportunidades de optimización en la cadena de producción.

El objetivo de esta metodología es proporcionar una base consistente y transparente que permita evaluar la huella de carbono de biocombustibles gaseosos en México.

Alcance

Esta metodología se genera con la finalidad de estimar la Huella de Carbono (HC) de cadenas de biocombustibles gaseosos, evaluando su Ciclo de Vida (CV) y basándose solo en una categoría de impacto: “Potencial de Calentamiento Global”.

El Potencial de Calentamiento Global define la medida en que cada uno de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) afecta a la atmósfera dependiendo de su composición y el periodo de tiempo que permanece en la atmósfera.

Esta metodología no aborda las emisiones evitadas ni especifica los requisitos para la divulgación de los resultados obtenidos.

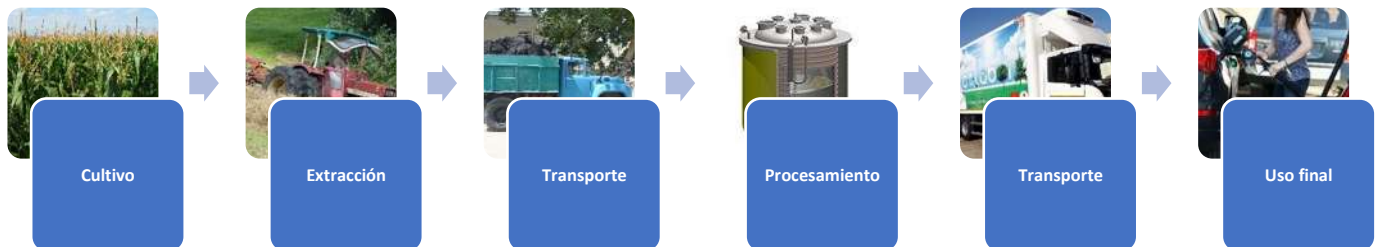
Referencias normativas

Se toma como referencia la Metodología PAS 2050 y el GHG Protocol.

Enfoques

En esta metodología la huella de carbono se abordará con el siguiente enfoque:

- **De la cuna hasta su uso final:** Cuantifica todas las emisiones en cada etapa del ciclo de vida del biocombustible desde el cultivo o extracción de las materias primas hasta su uso final.



Para las emisiones y absorciones (poner nota AL PIE) de GEI derivadas del ciclo de vida del biocombustible, la evaluación deberá incluir:

- Las emisiones de GEI derivadas de todos los procesos utilizados en la formación, extracción o transformación de los materiales utilizados en la producción del biocombustible.
- Todas las fuentes de emisiones y procesos de eliminación previstos que tengan una contribución importante al ciclo de vida emisiones de GEI de la unidad funcional.

¿A quién va dirigido?

A los desarrolladores y usuarios de tecnología y biocombustibles, así mismo a los hacedores de políticas públicas y al público en general.

Principios y aproximaciones

La evaluación de las emisiones de GEI de los biocombustibles en esta metodología se basa en el método establecido por el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ISO 14040 que consta de 4 fases que se ejemplifica a continuación:

Fases	Descripción
1. Definición de objetivo y alcance	Definición de: objetivo, límites del sistema, alcance y Unidad Funcional
2. Análisis de Inventario	Recopilación de datos primarios y secundarios
3. Evaluación de Impacto Ambiental	Calculo de los Resultados del Inventario
4. Interpretación	Discusión de resultados para obtener conclusiones, recomendaciones y tomar de decisiones.

Pasos para el Cálculo de la Huella de Carbono de Biocombustibles Gaseosos en México

Fase 1: Definición de objetivos y alcance

En esta primera etapa es necesario definir los objetivos de estudio, los límites del sistema a estudiar, e identificar elementos que conformen el ACV.

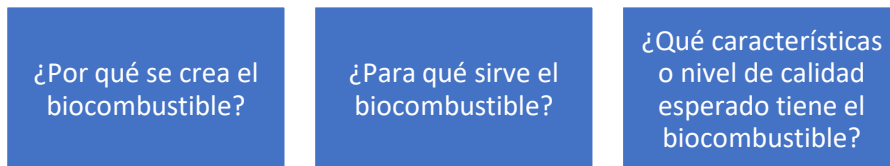
1. Definición de Objetivo.

Es necesario definir:

- Aplicación prevista.
- Razones para llevar a cabo el estudio.
- Audiencia prevista.
- Especificar si los resultados se van a usar en afirmaciones comparativas divulgado al público.

2. Unidad Funcional.

Es la base sobre la cual se realizarán todos los cálculos y define las características principales del biocombustible a evaluar, ya sea la función que cumple, la vida útil y el nivel de calidad esperado de los resultados. Por tanto, una unidad funcional bien establecida garantiza que los resultados del inventario se interpreten y utilicen correctamente. Algunas preguntas que se pueden hacer para elegir adecuadamente la unidad funcional son:



3. Alcance.

Deberán incluirse todas las emisiones de GEI que se generen dentro de los límites establecidos de evaluación del ciclo de vida del biocombustible.

Se contabilizarán todos los GEI establecidos por el IPCC en su última actualización.

4. Límites del sistema.

El límite del análisis incluirá los procesos atribuibles al ciclo de vida del biocombustible, es decir flujos de servicios, materiales y energía necesarios. En aquellos casos donde se han desarrollado requisitos adicionales que especifican un límite del sistema para el producto evaluados de conformidad con los principios establecidos deberán ser utilizados. Para realizarse puede:

Agrupar los procesos atribuibles en etapas del ciclo de vida

Identificar el servicio, el material y los flujos de energía necesarios para cada proceso atribuible

Ilustrar los procesos del ciclo de vida del producto a través de un mapa de proceso

5. Exclusiones.

Es posible excluir algunos procesos, pero deberá ser justificado, y podrán ser excluidos siempre y cuando no se cumplan estas tres condiciones:

- Los datos primarios o secundarios no se pueden recopilar.
- Los datos extrapolados y proxy no pueden determinarse para llenar el vacío de datos.
- Una estimación determina que los datos son insignificantes.

Fase 2: Análisis de Inventario

El objetivo principal de esta fase es recopilar datos para calcular la huella de Carbono generada durante el ciclo de vida del biocombustible a evaluar a través de un balance de materia y energía entre los componentes que conforman el ACV.

Se deberán recopilar todos los datos para los procesos incluidos en el límite del inventario, preferentemente **datos primarios**.

Los **datos primarios** son datos recopilados de procesos específicos en el ciclo de vida del biocombustible a evaluar, pueden ser datos de actividad de proceso, datos de emisiones directas desde un sitio específico o datos promediados en todos los sitios que contienen el proceso específico. Los datos primarios se pueden medir o modelar, siempre que el resultado sea específico del proceso en el ciclo de vida del biocombustible.

Notas:

Los datos de actividad financiera no se pueden usar para cumplir con el requisito de datos primarios.

También es posible hacer uso de **datos secundarios**, que se definen como datos que no provienen de procesos específicos en el ciclo de vida del biocombustible estudiado.

Existen distintas bases de datos del ciclo de vida que pueden utilizarse para recopilar datos secundarios, por lo que es indispensable asegurarse de que su enfoque geográfico, costo, frecuencia de actualización y procesos de revisión coincidan con el proceso que deseas evaluar. Algunas preguntas para usar en la selección de una base de datos se enumeran a continuación:

1. ¿Los datos fueron desarrollados usando una metodología consistente?
2. Para productos agrícolas y forestales, ¿se incluyen los impactos? En caso afirmativo, ¿qué impactos están incluidos?
3. ¿Qué antigüedad tiene la base de datos y qué tan extensamente se ha utilizado?
4. ¿Con qué frecuencia se actualiza la base de datos?
5. ¿Qué tan actuales son datos utilizados para desarrollar la base de datos?
6. ¿Se puede estimar la incertidumbre de los datos?
7. ¿La base de datos recopila datos de procesos reales o estimados/ calculados a partir de otras fuentes de datos?
8. ¿Existe algún riesgo de que los datos se perciban como sesgados y, de ser así, los datos y las metodologías se han revisado de forma independiente?

Notas: Falta de datos

En ocasiones es imposible recopilar datos que sean suficientemente representativos del proceso dado en el ciclo de vida del biocombustible. En estas ocasiones es posible utilizar datos proxy.

Los datos proxy son datos de procesos similares que se utilizan como sustituto para un proceso específico. Dichos datos se pueden extrapolar, ampliar o personalizar para representar el proceso dado.

Se puede hacer uso de datos primarios y secundarios siempre y cuando cumplan las siguientes referencias:

Periodicidad	Localización	Tecnología	Exactitud
•Se preferirán los datos que son específicos del tiempo para el producto que se evalúa.	•Se preferirán datos que sean geográficamente específicos del producto que se evalúa.	•Se preferirán datos que son específicos de la tecnología para el producto que se evalúa.	•Se preferirán datos que sean más precisos

El análisis de inventario debe incluir:

1. Emisiones.

Deberán incluirse todas las emisiones de GEI que se generen dentro de los límites establecidos de evaluación del ciclo de vida del biocombustible (Anexo 1). Se contabilizarán todos los GEI establecidos por el IPCC en su última actualización.

2. Período de tiempo para la inclusión de emisiones y absorciones de GEI.

La cuantificación de emisiones de GEI derivadas del ciclo de vida del biocombustible tendrán un período de evaluación de 100 años.

3. Cambio de uso de suelo.

4. Cambio en el carbono almacenado

En el caso de que no se presente cambio de uso de suelo, pero exista un cambio en el cultivo existente con el objetivo de obtener materia prima para la generación de biocombustible, es necesario determinar el cambio de carbono almacenado, por lo que a continuación se facilita una serie de ecuación para su cálculo.

4.1 Ecuaciones Alométricas

Las mediciones de las reservas de carbono en la biomasa adquieren una gran importancia para las cadenas de generación de biogás que prevén mitigar las emisiones de GEI. De este modo las ecuaciones alométricas, que permiten predecir la biomasa de un árbol a partir de las características dendrométricas más fáciles de medir (como su diámetro o su altura) son elementos clave para estimar la contribución de los ecosistemas forestales al ciclo del carbono (Picard et al., 2012).

Es posible generar ecuaciones específicas que vayan acorde con el cultivo de interés, y que incluya los factores abióticos presentes en el momento del cultivo, para esto es posible utilizar el manual titulado: “Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles, que se puede encontrar en:

<http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf>

O también es posible utilizar ecuaciones alométricas previamente establecidas. Existe una base de datos de 478 ecuaciones alométricas para estimar la biomasa forestal en plantas mexicanas, que puede ser consultado en la siguiente liga (Rojas et al., 2015):

https://www.researchgate.net/profile/Fabiola_Rojas-garcia/publication/271529413_Database_of_478_allometric_equations_to_estimate_biomass_for_Mexican_trees_and_forests/links/54cbdb780cf298d65659a845/Database-of-478-allometric-equations-to-estimate-biomass-for-Mexican-trees-and-forests.pdf

4.2 Tierras agrícolas que siguen siendo tierras agrícolas

En esta sección se incluyen ecuaciones que serán utilizadas para inventariar y notificar las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en "tierras agrícolas que siguen siendo tierras agrícolas" (TATA) y en "tierras convertidas en tierras agrícolas" (TTA). Dichas ecuaciones han sido tomadas del manual: “Orientación sobre las buenas prácticas en el sector de CUTS”.

La cantidad de carbono almacenada en las tierras agrícolas permanentes y emitida o absorbida de dependerá del tipo de cultivo, de las prácticas de gestión y de las variables del suelo y del clima.

4.2.1 Variación anual de las reservas de carbono en tierras agrícolas que siguen siendo tierras agrícolas.

Ecuación 1 (3.3.1)

$$\Delta C_{TATA} = \Delta C_{TATABV} + \Delta C_{TATASuelos}$$

Donde:

ΔC_{TATA} = variación anual de las reservas de carbono en tierras agrícolas que siguen siendo tierras agrícolas, en toneladas de C año⁻¹.

ΔC_{TATABV} = variación anual de las reservas de carbono en la biomasa viva, en toneladas de C año⁻¹

$\Delta C_{TATASuelos}$ = variación anual de las reservas de carbono en el suelo, en toneladas de C año⁻¹

Cuadro 1 3.3.1 descripción por niveles de las subcategorías de tierras agrícolas que siguen siendo tierras agrícolas			
Nivel	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Biomasa viva (para los cultivos leñosos perennes)	Utilizar coeficientes por defecto para las tasas de acumulación y pérdida de carbono. La superficie media de cultivos leñosos perennes se debe estimar.	Utilizar valores específicos del país respecto de las tasas de acumulación y pérdida de carbono. Utilizar estudios anuales o periódicos detallados para estimar el área de tierra con cultivos leñosos perennes, desglosada en escalas que concuerden con las tasas específicas del país.	Utilizar estimaciones de superficie muy desglosadas para categorías detalladas de cultivos leñosos perennes (por ejemplo, café, huertos, sistemas de Inter cultivo). Aplicar tasas o estimaciones específicas del país respecto de la variación del carbono almacenado en los sistemas de cultivo leñoso perenne.

			Podrá utilizarse una metodología específica del país a escala espacial fina
Suelos	<p>Para las variaciones del carbono en suelos minerales, utilizar coeficientes por defecto.</p> <p>Para las variaciones del carbono en suelos orgánicos utilizar coeficientes por defecto y estratificar las superficies por regiones climáticas. Para las emisiones procedentes del encalado, utilizar factores de emisión por defecto, conforme a las Directrices del IPCC.</p>	<p>Para los suelos minerales y orgánicos, utilizar una combinación de coeficientes y de estimaciones de superficie por defecto y/o específicos del país, con una resolución espacial cada vez más fina.</p> <p>Para las emisiones procedentes del encalado utilizar factores de emisión diferenciados por tipos de encalado.</p>	<p>Para los suelos minerales y orgánicos, utilizar una combinación de coeficientes y de estimaciones de superficie por defecto y/o específicos del país, con una resolución espacial cada vez más fina.</p> <p>Para las emisiones procedentes del encalado utilizar factores de emisión diferenciados por tipos de encalado.</p>

4.2.2 Variación de las reservas de carbono en la biomasa viva

El carbono puede almacenarse en la biomasa de las tierras agrícolas que contienen vegetación leñosa perenne.

Nota: La variación de la biomasa se estima solamente para los cultivos leñosos perennes. Para los cultivos anuales, se supondrá que el aumento de las reservas de biomasa en un solo año es igual a las pérdidas de biomasa por recolección y mortalidad en ese mismo año; es decir, no hay acumulación neta del carbono almacenado en la biomasa.

La ecuación principal respecto de la variación total del carbono almacenado en la biomasa viva en cultivos leñosos perennes de tierras agrícolas (ΔC_{TATABV}) es:

Ecuación 2

$$\Delta C_{TTFBV} = (\Delta C_{TTF} - \Delta C_{TTFP})$$

ΔC_{TTFBV} = variación anual de las reservas de carbono en la biomasa viva (incluye la biomasa sobre el suelo y bajo el suelo) en tierras forestales que siguen siendo tierras forestales, en toneladas de C año⁻¹

ΔC_{TTF} = aumento anual de las reservas de carbono debido al crecimiento de la biomasa, en toneladas de C año⁻¹

ΔC_{TTFP} = disminución anual de las reservas de carbono debido a la pérdida de biomasa, en toneladas de C año⁻¹

Factores de emisión/absorción

Los factores de emisión y absorción consisten en la acumulación de biomasa (C) y las tasas de pérdida (P).

En el Cuadro 2 se ofrecen valores por defecto de C y P para cuatro regiones climáticas generales, en base a una revisión publicada de investigaciones sobre las reservas de carbono en sistemas agroforestales (Schroeder, 1994).

La tasa de crecimiento anual por defecto (C) se ha obtenido dividiendo las reservas de biomasa en la madurez por el tiempo transcurrido desde el establecimiento del cultivo hasta la recolección/madurez.

La tasa de pérdida anual por defecto es igual a las reservas de biomasa en la recolección, que se supondrán completamente eliminada en el año de absorción.

Para un país dado, estos valores por defecto son muy inciertos, ya que representan sistemas de cultivo genéricos de biomasa boscosa perenne para regiones climáticas generales. Los cultivos leñosos varían mucho en cuanto a sus usos y tasas de crecimiento y de recolección, y en cuanto al grado de asociación con otros cultivos no boscosos, con lo que la aplicación de factores por defecto simples proporcionar únicamente una aproximación grosera de las variaciones del carbono.

CUADRO 2 (3.3.2) Coeficientes por defecto para la biomasa boscosa sobre el suelo y los ciclos de recolección en sistemas de cultivo que contienen especies perennes

Región climática	Reservas de C en la biomasa sobre el suelo en recolección (ton de C ha ⁻¹)	Ciclo recolección /madurez (años)	Tasa de acumulación de biomasa (C) (ton de C ha ⁻¹ año ⁻¹)	Pérdida de C de biomasa (P) (ton de C ha ⁻¹)	Escala de error
Región templada (todos los regímenes de humedad)	63	30	2.1	63	+ 75%
Tropical, seca	9	5	1.8	9	+ 75%
Tropical, húmeda	21	8	2.6	21	+ 75%
Tropical, muy húmeda	50	5	10	50	+ 75%

3.3. Variación de las reservas de carbono en los suelos

Para realizar este cálculo se toma como referencia la variación de las reservas de carbono orgánico (emisiones o absorciones de CO₂) en suelos minerales, las emisiones de CO₂ en

suelos orgánicos (es decir, turberas), y las emisiones de CO₂ procedentes del encalado de suelos agrícolas. En las Directrices del IPCC, las reservas de carbono se miden hasta una profundidad por defecto de 30 cm, y no incluyen el C de los residuos superficiales (es decir, de la materia orgánica muerta) ni las variaciones del carbono inorgánico (es decir, de los minerales carbonatados). En la mayoría de suelos de cultivo, no hay residuos superficiales (como consecuencia de la incorporación debida a la labranza), o bien representan una cantidad secundaria.

3.3.1 Variación anual de las reservas de carbono en el suelo en tierras agrícolas que siguen siendo agrícolas.

Ecuación 3 3.3.2

$$\Delta C_{TATA\text{Suelos}} = \Delta C_{TATA\text{Minerales}} - \Delta C_{TATA\text{Orgánicos}} - \Delta C_{TATA\text{CaI}}$$

Donde:

$\Delta C_{TATA\text{Suelos}}$ = variación anual de las reservas de carbono en el suelo en tierras agrícolas que siguen siendo agrícolas, en ton de C año⁻¹.

$\Delta C_{TATA\text{Minerales}}$ = variación anual de las reservas de carbono en suelos minerales, en ton de C año⁻¹

$\Delta C_{TATA\text{Orgánicos}}$ = Emisiones de carbono anuales de suelos orgánicos cultivados, en ton de C año⁻¹

$\Delta C_{TATA\text{CaI}}$ = Emisiones de C anuales procedentes del encalado con fines agrícolas, en ton de C al año⁻¹

La elección del nivel más adecuado depende de:

- 1) Tipo y grado de detalle de los datos de actividad con respecto a la gestión agrícola y a los cambios de gestión a lo largo del tiempo.
- 2) Disponibilidad de información adecuada para estimar las reservas básicas de C, la variación de las reservas y los factores de emisión.
- 3) Disponibilidad de sistemas de inventario nacionales especializados, diseñados para los suelos.

3.4 Carbono almacenado en suelos minerales

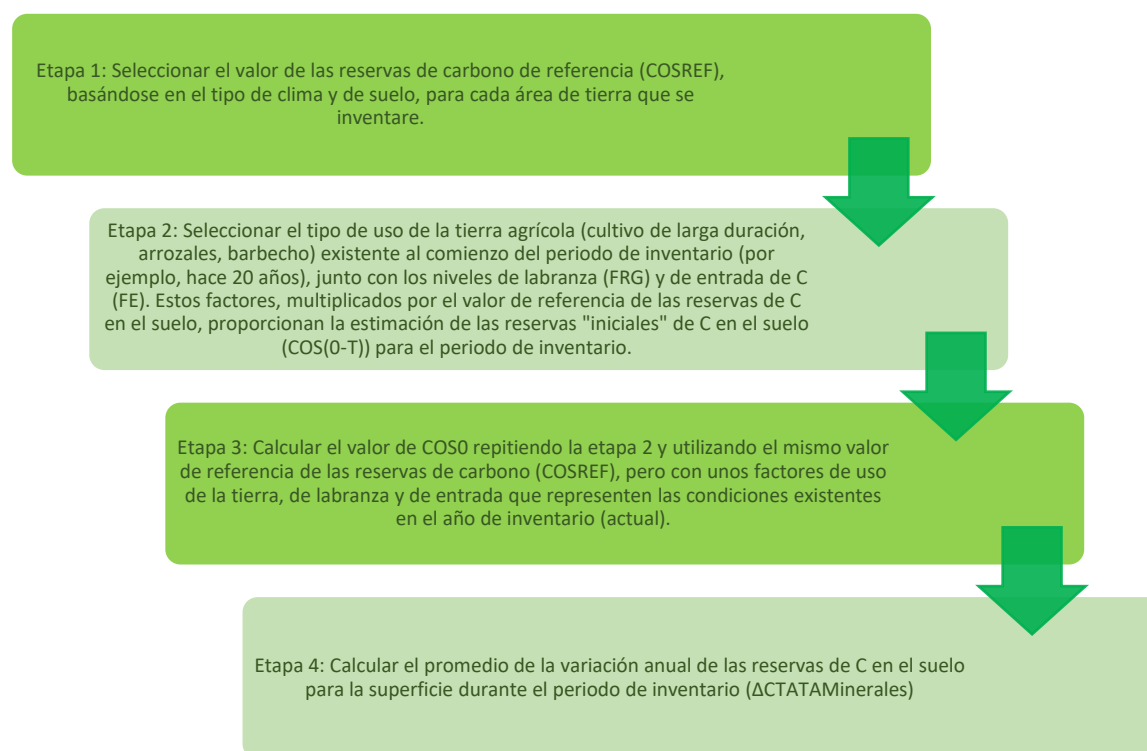
El método utilizado para estimar la variación del carbono almacenado en suelos minerales se basa en la variación de las reservas de C en el suelo a lo largo de un periodo finito posterior a los cambios de gestión que repercuten en el C del suelo, donde el periodo por defecto es 20 años.

Los tipos de uso de la tierra y factores de gestión indicados están definidos en líneas generales, y abarcan:

- 1) un factor de uso de la tierra (FUT) que refleja la variación de las reservas de C asociada a un tipo de uso de la tierra;
- 2) un factor de gestión (FRG) que, para una tierra agrícola permanente, representa tipos diferentes de labranza.
- 3) un factor de entrada (FE) que representa diferentes niveles de aporte de C en el suelo.

En tierras agrícolas, FUT describe las reservas básicas de C para suelos cultivados por largos periodos, arrozales, y tierras agrícolas en barbecho, con respecto a las reservas de C en suelos nativos (sin cultivar).

Los cálculos para determinar COS_0 y $COS(0-T)$ y la variación neta de las reservas de C en el suelo por ha se realizan mediante las siguientes etapas:



ECUACIÓN 3.3.3

Variación anual de las reservas de carbono en suelos minerales para un solo sistema de tierras agrícolas

$$\Delta C_{TATAMinerales} = [(COS_0 - COS_{(0-T)}) \cdot S] / T$$

$$COS = COS_{REF} \cdot FUT \cdot FRG \cdot FE$$

$\Delta C_{TATAMinerales}$ = variación anual de las reservas de carbono en suelos minerales, en ton de C año⁻¹.

COS₀ = variación de carbono orgánico del suelo en el año de inventario, en ton de C ha⁻¹.

COS(0-T) = reservas de carbono orgánico del suelo T años antes del inventario, en ton de C ha⁻¹.

T = periodo de inventario, en años (valor por defecto: 20 años)

S = superficie de cada parcela, en ha.

COS_{REF} = valor de referencia de las reservas de carbono en ton de C ha⁻¹ (Cuadro 3).

FUT = factor de variación de las reservas para un uso de la tierra o para un cambio de uso de la tierra, sin dimensiones (Cuadro 4).

FRG = factor de variación de las reservas para un régimen de gestión, sin dimensiones (Cuadro 4).

FE = factor de variación de las reservas para una entrada de materia orgánica, sin dimensiones (Cuadro 4)

Cuadro 3 (3.3.3)

Región	Suelos AAA ¹	Suelos ABA ²	Suelos Arenosos ³	Suelos sódicos ⁴	Suelos volcánicos ⁵	Suelos de humedal ⁶
Boreal	68	NA	10	117	20	146
Templada fría, seca	50	33	34	NA	20	87
Templada fría, húmeda	95	85	71	115	130	
Templada cálida, seca	38	24	19	NA	70	88
Templada cálida, húmeda	88	63	34	NA	80	
Tropical, seca	38	35	31	NA	50	86
Tropical, húmeda	65	47	39	NA	70	

Tropical, muy húmeda	44	60	66	NA	130	
----------------------	----	----	----	----	-----	--

Nota: Los datos han sido obtenidos de las bases de datos de suelos descritas por Jobbagy y Jackson (2000) y Bernoux et al. (2002). Las reservas están expresadas en valores medios. Para los tipos de suelo-clima se utiliza una estimación de error por defecto del 95% (expresada como el doble de la desviación estándar como porcentaje de la media). NA significa "no aplicable", dado que estos suelos no suelen darse en algunas zonas climáticas.

1. **Suelos con minerales de arcilla de alta actividad (AAA):** son suelos con un nivel de desgaste entre leve y moderado, en los que predominan minerales de arcillas silicatadas 2:1 (en la clasificación de la Base Mundial de Referencia para los Recursos Edáficos (BMR), este grupo abarca los leptosoles, vertisoles, kastanozems, chernozems, phaeozems, luvisoles, alisoles, albeluvisoles, solonetz, calcisoles, gypsisoles, umbrisoles, cambisoles, regosoles; en la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) se incluyen también los mollisoles, vertisoles, alfisoles muy alcalinos, aridisoles e inceptisoles).
2. **Suelos con minerales de arcilla de baja actividad (ABA):** son suelos muy desgastados en los que predominan los minerales de arcilla 1:1 y el hierro amorfo, así como los Óxidos de aluminio (en la clasificación BMR se incluyen los acrisoles, lxisoles, nitisoles, ferralsoles, durisoles; en la clasificación USDA se incluyen también los ultisoles, los oxisoles y los alfisoles ácidos).
3. **Suelos Arenosos:** incluye todo tipo de suelos (con independencia de su clasificación taxonómica) que contengan más de un 70% de arena y menos de un 8% de arcilla en base a análisis de textura tipificados; en la clasificación BMR se incluyen los arenosoles; en la clasificación del USDA se incluyen los aumentos).
4. **Suelos fuertemente podzolizados** (en la clasificación BMR se incluyen los podzoles; en la clasificación USDA, los espodosoles).
5. **Suelos volcánicos:** suelos derivados de cenizas volcánicas con mineralogía alofónica (en la clasificación de la BMR, andosoles; en la clasificación del USDA, andosoles).
6. **Suelos de humedal:** Suelos con drenaje restringido que ocasiona crecidas periódicas y condiciones anaeróbicas (en la clasificación de la BMR, gleysoles; en la clasificación del USDA, los subórdenes ácuicos)

Cuadro 4 (3.3.4)

Tipo de valor del factor	Nivel	Régimen de T	Valor por defecto IPCC		Valor por defecto revisado de la OBP
Uso de la Tierra (FUT)	Cultivo de larga duración	Templado	0.7	Seco	0.82
				Muy húmedo	0.71
		Tropical	0.6	Seco	0.69
				Muy húmedo	0.58
Uso de la Tierra (FUT)	Arrozal	Templado y tropical	1.1	Seco y muy húmedo	1.1
Uso de la Tierra (FUT)	Barbecho (<20 años)	Templado y tropical	0.8	Seco	0.93
				Muy húmedo	0.82
Labranza (FRG)	Completo	Templado	1	Seco y muy húmedo	1
		Tropical	0.9		
Labranza (FRG)	Reducido	Templado	1.05	Seco	1.03
				Muy húmedo	1.09
		Tropical	1	Seco	1.1
				Muy húmedo	1.16
Labranza (FRG)		Templado	1.1	Seco	1.1

	Sin labranza			Muy húmedo	1.16
		Tropical	1.1	Seco	1.17
				Muy húmedo	1.23
Entrada (FE)	Bajo	Templado	0.9	Seco	0.92
				Muy húmedo	0.91
		Tropical		Seco	0.92
				Muy húmedo	0.91
Entrada (FE)	Medio	Templado	1	Seco y muy húmedo	1
		Tropical	0.9	Seco y muy húmedo	1
Entrada (FE)	Alto-sin estiércol	Templado y tropical	1.1	Seco	1.07
				Muy húmedo	1.11
Entrada (FE)	Alto- con estiércol	Templado y tropical	1.2	Seco	1.34
				Muy húmedo	1.38

Nivel 1: En el Nivel 1 se utilizan valores de referencia por defecto de los factores de reservas de carbono y de variación de las reservas de carbono (como se indica en la ecuación 3.3.3) para las principales tierras agrícolas de un país, estratificados por tipos de clima y de suelo por defecto (ecuación 3.3.4). Para la superficie total de tierras agrícolas que siguen siendo

tierras agrícolas, la variación de las reservas puede calcularse vigilando los cambios de gestión y calculando la variación de las reservas en parcelas de tierra individuales (ecuación 3.3.B), o calculando las reservas de carbono en el suelo totales al comienzo y al final del periodo de inventario a partir de otros datos más generales sobre la distribución superficial de los sistemas de tierra agrícola (ecuación 3.3.4A). Los resultados globales serán los mismos en cualquiera de las dos metodologías, aunque la diferencia principal estriba en que para atribuir los efectos de determinados cambios de gestión serán necesarios datos de actividad que consideren los cambios de gestión en determinadas superficies de tierra.

ECUACIÓN 3.3.4 VARIACIÓN ANUAL DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN SUELOS MINERALES EN TIERRAS AGRÍCOLAS QUE SIGUEN SIENDO TIERRAS AGRÍCOLAS

$$A) \Delta C_{TATAMinerales} = \sum c \sum s \sum i [(COS_0 - COS_{(0-T)}) \bullet S]_{c,s,i} / T$$

$$B) \Delta C_{TATAMinerales} = [\sum c \sum s \sum i (COS_0 \bullet S)_{c,s,i} - \sum c \sum s \sum i (COS_{(0-T)} \bullet S)_{c,s,i}] / T$$

Donde:

$\Delta C_{TATAMinerales}$ = variación anual de las reservas de carbono en suelos minerales, en ton de C año⁻¹

COS_0 = reservas de carbono orgánico del suelo en el año de inventario, en ton de C ha⁻¹

$COS_{(0-T)}$ = reservas de carbono orgánico del suelo T años antes del inventario, en ton de C ha⁻¹.

T = periodo de inventario, en años (valor por defecto: 20 años).

S = superficie de cada parcela de tierra, en ha

c= representa las zonas climáticas, s los tipos de suelo, e i el conjunto de los principales sistemas de tierra agrícola presentes en un país.

Nivel 2: En el Nivel 2 se utilizan las mismas ecuaciones básicas que en el Nivel 1, aunque con valores específicos del país para las reservas de carbono de referencia y/o los factores de variación de las reservas. Además, las metodologías del Nivel 2 implicarán probablemente una estratificación más detallada de los sistemas de gestión si se dispone de datos suficientes.

Nivel 3: Las metodologías del Nivel 3, basadas en una combinación de modelos dinámicos con mediciones detalladas del inventario de emisiones/variación de las reservas de C en el suelo, no utilizarán probablemente factores simples de variación de las reservas o de emisión per se. Las estimaciones de las emisiones utilizando planteamientos basados en modelos se obtienen de la interacción de ecuaciones múltiples que permiten estimar mediante los modelos la variación neta de las reservas de C en el suelo. Hay una gran diversidad de modelos deseados para simular la dinámica del carbono en los suelos (véanse, por ejemplo, los trabajos de McGill et al., 1996; Smith et al., 1997).

Suelos orgánicos

La metodología básica para estimar la variación de las reservas de carbono en suelos orgánicos (por ejemplo, derivados de turberas) consiste en asignar una tasa de pérdida anual de C por efecto del drenaje y de otras alteraciones como la labranza de la tierra para la producción agrícola. El drenaje y la labranza estimulan la oxidación de la materia orgánica previamente constituida en un entorno muy anóxico. La superficie de suelo orgánico de las tierras agrícolas para cada tipo de clima se multiplica por el factor de emisión para obtener una estimación de las emisiones anuales de C, como se indica en la ecuación 3.3.5:

ECUACIÓN 3.3.5

Emisiones de CO₂ procedentes de suelos orgánicos cultivados en tierras agrícolas que siguen siendo tierras agrícolas

$$\Delta C_{TATAOrgánicos} = \sum_c (S \bullet FE)_c$$

Donde:

$\Delta C_{TATAOrgánicos}$ = emisiones de CO₂ procedentes de suelos orgánicos cultivados en tierras agrícolas que siguen siendo tierras agrícolas, en toneladas de C año⁻¹.

S = superficie de suelos orgánicos para el tipo de clima c, en ha

FE = factor de emisión para el tipo de clima c (base el Cuadro 3.3.5), en toneladas de C ha⁻¹ año⁻¹.

Nivel 1: En el Nivel 1, los factores de emisión por defecto (Cuadro 3.3.5) se utilizarán junto con las estimaciones de superficie para suelos orgánicos cultivados en cada región climática existente en el país (ecuación 3.3.5).

Nivel 2: En el Nivel 2 se utiliza la ecuación 3.3.5, en la cual los factores de emisión se estiman a partir de datos específicos del país estratificados por regiones climáticas, como se indica en la Sección 3.3.2.1.3. Las estimaciones de superficie deberían desarrollarse con arreglo a las orientaciones del Capítulo 2.

Nivel 3: Las metodologías del Nivel 3 para los suelos orgánicos abarcarán sistemas más detallados que integren modelos dinámicos y redes de medición, conforme se ha descrito para los suelos minerales.

CUADRO 3.3.5 Factores de emisión (fe) anuales para suelos orgánicos cultivados		
Régimen de temperatura climático	Valor por defecto de las Directrices del IPCC (toneladas de C ha ⁻¹ año ⁻¹)	Error
Templado frío	1	+ 90%
Templado cálido	10	+ 90%
Tropical/subtrópica	20	+ 90%

Las emisiones de GEI derivadas del cambio directo en el uso de la tierra se evaluarán en relación con cualquier aportación al ciclo de vida del biocombustible que se origine en esa tierra y se incluirán en la evaluación de las emisiones de GEI del biocombustible. Es indispensable enfatizar la obtención de datos representativos y confiables para este apartado, así como transparencia en los cálculos realizados.

Notas:

- La evaluación del impacto del CUS incluirá todo CUSD de la tierra que hubiera ocurrido en un periodo anterior no mayor a 20 años, o un único período de cosecha, antes de realizar la evaluación (lo que sea más largo). Las emisiones y absorciones totales de GEI derivadas del CUSD durante ese período se incluirán en la cuantificación de las emisiones de GEI.
- Donde se puede demostrar que el CUS ocurrió hace más de 20 años, no se deben incluir emisiones en la evaluación.

4.1 Conocimiento limitado del momento del cambio de uso del suelo

Cuando no se pueda demostrar que el cambio de uso de la tierra es mayor a 20 años, o un solo período de cosecha, se supondrá que el cambio en el uso de la tierra ocurrió el 1 de enero de:

- a) el año más temprano en el que se puede demostrar que el CUS se ha producido.
- b) el 1 de enero del año en que se lleva a cabo la evaluación de las emisiones y absorciones de GEI.

La siguiente jerarquía se aplicará cuando se determinen las emisiones y absorciones de GEI derivadas de cambios en el uso de la tierra que ocurran en un periodo de no más de 20 años o un solo período de cosecha, antes de realizar la evaluación:

Cuando se conoce el país de producción y el uso anterior de la tierra, las emisiones de GEI que surjan del CUS serán aquellas que resulten del cambio en el uso de la tierra desde el uso anterior de la tierra hasta el uso actual de la tierra en ese país.



Cuando se conoce el país de producción, pero se desconoce el uso anterior de la tierra, las emisiones de GEI que surja del CUS será la estimación de las emisiones promedio del cambio de uso de la tierra para ese cultivo en ese país.



Cuando no se conoce ni el país de producción ni el anterior uso de la tierra, las emisiones de GEI derivadas del CUS serán el promedio ponderado de las emisiones promedio de CUS de ese producto en los países en los que se cultiva.

5. Energía

Las emisiones y absorciones de GEI asociadas con la provisión y el uso de energía en el ciclo de vida del biocombustible se incluirá en las emisiones derivadas del sistema de suministro de energía y de combustibles empleados. Para su contabilidad, cuando un proveedor de electricidad puede entregar un factor de emisión específico y estas emisiones están excluidas del factor de emisión regional, se deben usar los datos de electricidad del proveedor. De lo contrario, se tomará en cuenta el factor de emisión eléctrico encontrado en la base de datos de Ecoinvent para México (Anexo 2).

Existen también factores de emisión específicos para ciertos tipos de combustibles, que de ser el caso deberán utilizarse en el cálculo de la HC (Anexo3).

Los datos de combustible y energía incluirán:

- a) la cantidad de energía utilizada.
- b) el factor de emisión promedio de la entrada de energía basado en la fuente de energía utilizada.

5.1 Generación in situ de electricidad y calor

Cuando se genere electricidad y/o calor y se use en el sitio, el factor de emisión para la electricidad y/o calor se calculará utilizando el método descrito en esta metodología más

las emisiones aguas arriba de la generación incluidas las emisiones de entrada de combustible y las emisiones aguas arriba.

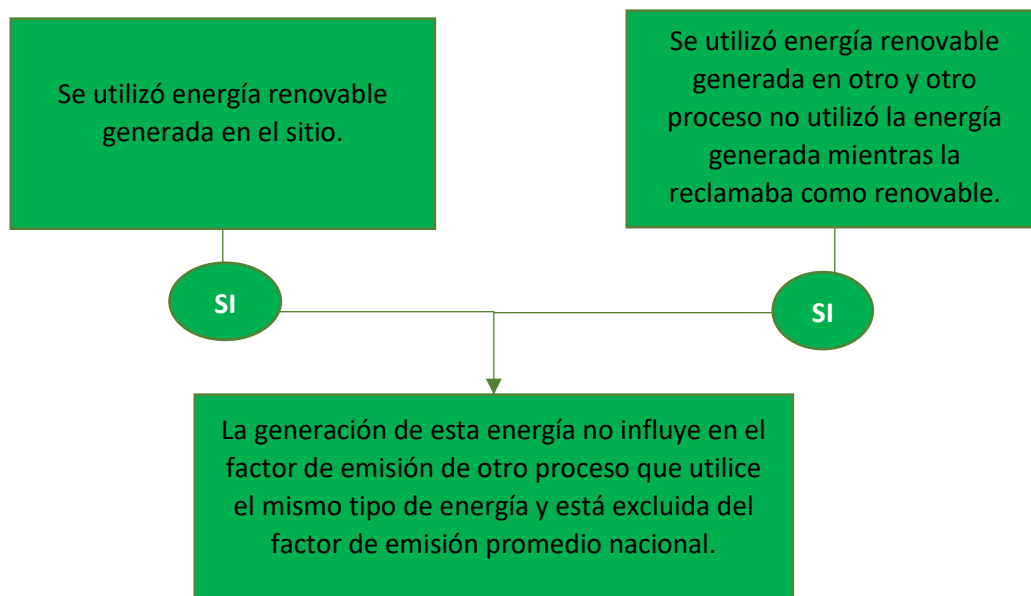
5.2 Combustión de desechos con recuperación de energía

Cuando los desechos o el combustible derivado de los desechos se queman para generar electricidad y/o calores útiles, las emisiones de GEI se deben asignar a la generación de la energía. La captura de CO2 también se asignarán al sistema de generación de energía.

5.3 Emisiones de GEI asociadas a la generación de energía eléctrica mediante energías renovables

5.3.1 Elegibilidad de factores de emisión específicos de energía renovable.

Se aplicará un factor de emisión específico de energía renovable a un proceso que utilice energía renovable solo cuando se demuestre lo siguiente:



Cuando no se cumplan dichas condiciones se utilizarán factores de emisión de energía promedio nacional.

5.3.2 Emisiones de biomasa y biocombustibles

Las emisiones y absorciones que surjan del uso de biomasa incluirán las emisiones y absorciones de GEI derivadas tanto de la producción del combustible como de la combustión del combustible. Habría que excluir al CO₂.

Notas:

- Cuando el biocombustible se produce a partir de desechos, las emisiones de GEI derivadas de la producción del combustible son las derivadas de la conversión de los desechos en combustible.
- Cuando el biocombustible no se produce a partir de desechos, las emisiones de GEI asociadas a la generación del biocombustible deberán incluir las emisiones de CUSD.

6. Bienes capitales.

Las emisiones y absorciones de GEI derivadas de la producción de bienes de capital utilizados en el ciclo de vida del biocombustible se excluirán de la evaluación a menos que se prevean requisitos adicionales.

7. Fabricación y prestación de servicios.

Las emisiones y absorciones de GEI derivadas de la fabricación y la prestación de servicios que ocurren como parte del ciclo de vida del biocombustible, incluidas las emisiones asociadas con el uso de bienes fungibles. Cuando se utiliza un proceso para crear prototipos de un nuevo producto, las emisiones asociadas con las actividades de prototipos se deben asignar al biocombustible y a los coproductos derivados.

8. Funcionamiento de las instalaciones.

Las emisiones y absorciones de GEI derivadas del uso de las instalaciones, incluidas las de fábricas, almacenes, centros centrales de suministro, oficinas, etc., se incluirán en la evaluación del Emisiones de GEI del ciclo de vida del producto.

9. Transporte.

Se deberán incluir todas las emisiones de GEI asociadas con el trayecto desde el origen hasta el punto de entrega y viceversa de materia prima utilizada durante el ciclo de vida del biocombustible, incluidas las derivadas de cualquier parte del trayecto en que los productos no fueron transportados. Cuando se transporta más de un producto en un mismo transporte, las emisiones derivadas del sistema de transporte se dividirán entre los productos de acuerdo a:

a) donde la masa es el factor limitante, dependerá de la masa relativa de los diferentes productos transportados.

En los casos donde los viajes de regreso se usan para transportar otros productos, las emisiones de esos viajes se asignarán a los productos transportados a la vuelta viaje.

De existir requisitos adicionales relacionados con el transporte para el producto deberán ser utilizados.

10. Almacenamiento de productos.

Las emisiones de GEI derivadas del almacenamiento se incluirán en la evaluación de las emisiones de GEI del ciclo de vida del biocombustible, que incluyen:

- a) almacenamiento de insumos, incluidas las materias primas, en cualquier punto del ciclo de vida del biocombustible.
- b) controles ambientales.
- c) almacenamiento de productos en la fase de uso;
- d) almacenamiento antes de las actividades de reutilización, reciclaje o eliminación.

11. Fase de uso.

Las emisiones y absorciones de GEI derivadas del uso de productos se incluirán en la evaluación de las emisiones de GEI en el ciclo de vida del biocombustible, si así lo establecen sus límites.

12. Impacto del producto en la fase de uso de otros productos

Cuando la operación o aplicación de un producto provoque un cambio (ya sea aumento o disminución) en las emisiones de GEI derivadas de la fase de uso de otro producto, este cambio se excluirá de la evaluación de las emisiones de GEI del ciclo de vida del biocombustible.

hola

13. Exclusiones de límites del sistema

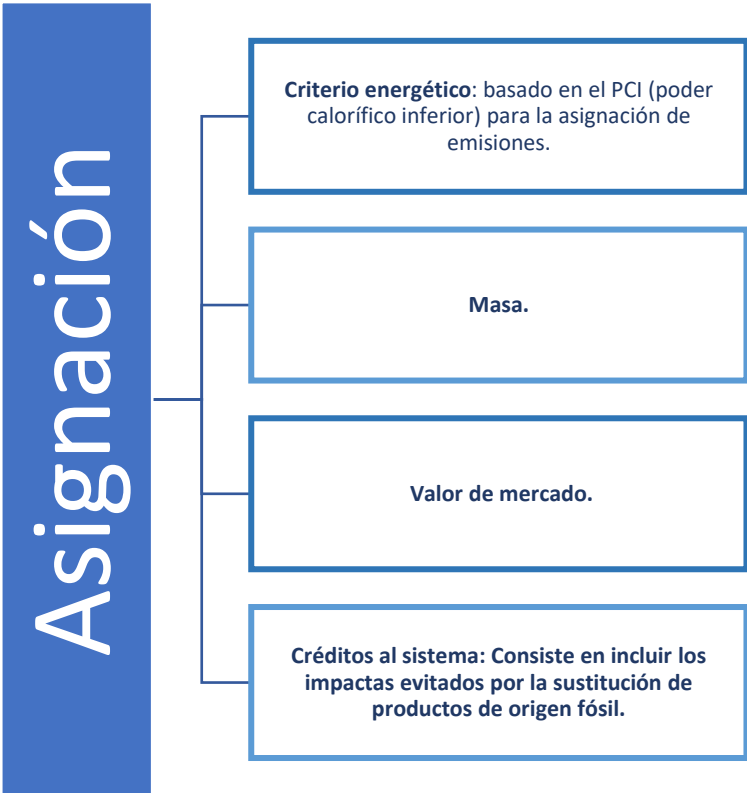
El límite del sistema del ciclo de vida del producto excluirá las emisiones de GEI asociadas con:

- a) insumos de energía humana para procesos y / o preprocesamiento
- b) transporte de consumidores hacia y desde el punto de compra minorista;
- c) transporte de empleados hacia y desde su lugar de trabajo normal;
- d) animales que prestan servicios de transporte

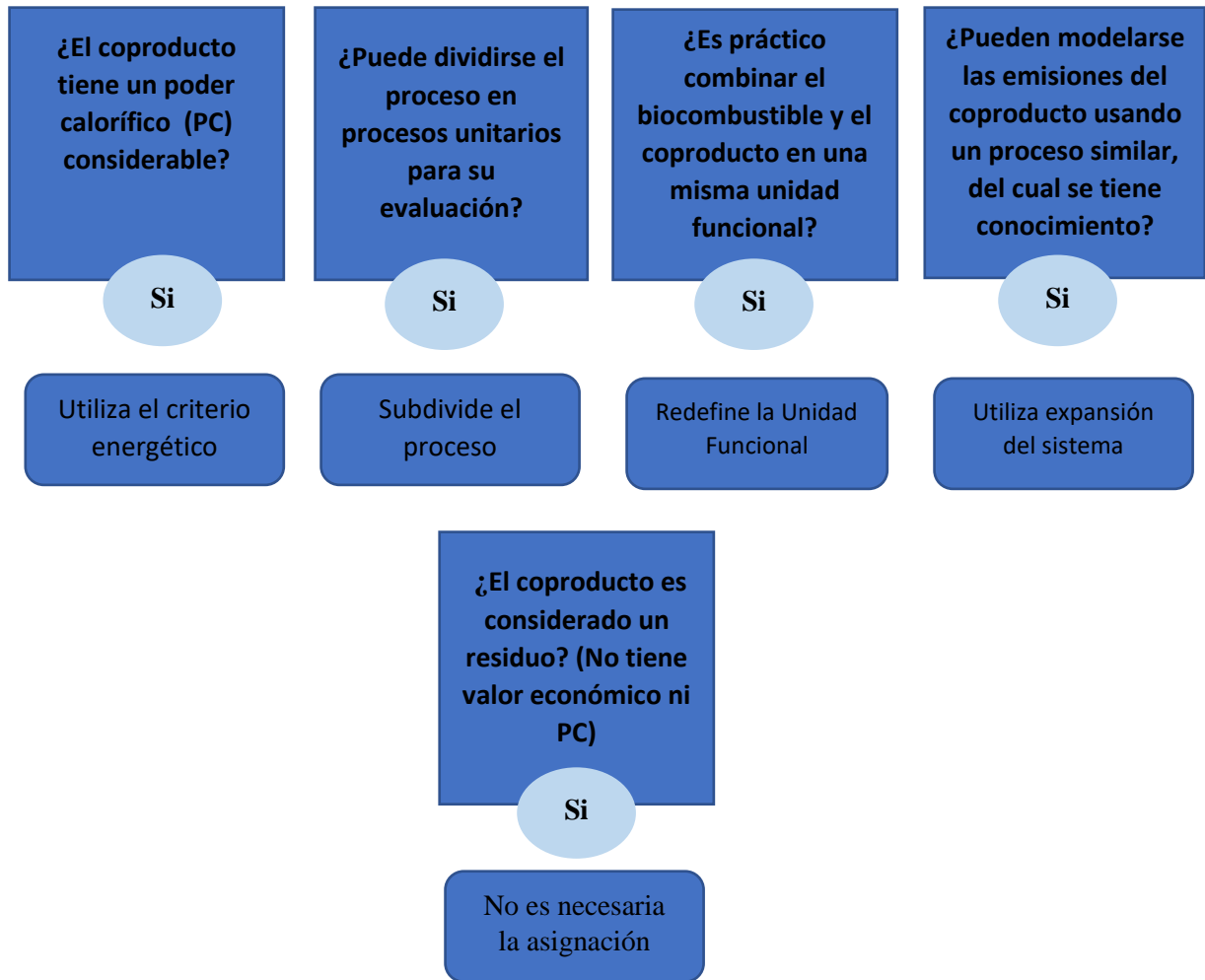
14. Asignación a coproductos

En ocasiones, durante el ciclo de vida del biocombustible, es común que exista al menos un proceso que tenga más de un producto con valor como entrada o salida. En estas situaciones, las emisiones totales del proceso deben dividirse entre las múltiples entradas y salidas. Esta división se conoce como asignación, un elemento importante y a veces desafiante de un proceso de inventario de productos. La asignación exacta de las emisiones o eliminaciones al producto estudiado es esencial para mantener la calidad de un inventario de GEI.

En esta metodología la asignación de emisiones a los coproductos será en orden de preferencia:



Criterios para seleccionar un método de asignación:



Consideraciones:

1. Cambios en el ciclo de vida de un producto

Cambio temporal no planificado

De ocurrir algún cambio no planificado en el ciclo de vida del biocombustible que resulte en un aumento en la evaluación de emisiones de GEI de más del 10% y se experimentan durante más de tres meses, es necesario realizar una reevaluación de la HC.

Cambio planificado

De ocurrir algún cambio planificado en el ciclo de vida de las emisiones de GEI de un biocombustible que conduzca a un aumento en el resultado de la evaluación de 5% o más por un período que exceda los tres meses, es necesario realizar una reevaluación de la vida ciclo de emisiones de GEI asociadas.

2. Validez del análisis

Los resultados obtenidos de la implementación de esta metodología serán válidos por un período máximo de dos años, a menos que haya un cambio en el ciclo de vida del producto cuyas emisiones de GEI se están evaluando.

Fase 3: Evaluación de Impacto Ambiental

Esta fase tiene como finalidad comprender y evaluar la magnitud e importancia de los impactos ambientales potenciales generados durante el ciclo de vida del biocombustible evaluado.

Potencial de Calentamiento Global

Los valores de los potenciales de calentamiento global que se utilizarán en los cálculos deberán estar de acuerdo con la última actualización que se tenga de valores definidos por el IPCC, debido a que el forzamiento radiativo es una función de la concentración de GEI en la atmósfera, las metodologías para calcular el GWP continúa evolucionando, los factores de GWP son reevaluados cada pocos años.

Dichas emisiones se medirán por masa y se convertirá en CO_{2e} utilizando los últimos Coeficientes de potencial de calentamiento atmosférico (GWP) de 100 años del IPCC. Una tabla con los valores de GWP más recientes está disponible en (Anexo GEI):

https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html#table-2-14

Cuando se recopilan los datos del ciclo de vida del biocombustible, la ecuación básica para calcular el CO_{2e} para una entrada, salida o proceso es:

$$kgCO_2e = \text{Datos de actividad (unidad)} \times \text{Factor de Emisión} \left(\frac{kgGEI}{\text{unidad}} \right) \times PCG(kgCO_2e / kgGEI)$$

Nota:

Para la realización de esta fase de la evaluación se ha desarrollado una hoja de Excel que puede servir como base para el cálculo de la huella de carbono del biocombustible de interés.

Fase 4: Interpretación

Identifica, cuantifica, revisa y valora los datos arrojados derivado de los resultados de la fase de inventario y evaluación. Provee ventajas comparativas en al proporcionar los elementos del análisis de estudio, que ayudan a identificar oportunidades de cambio en las etapas del proceso productivo.

Anexos

Anexo 1. Potencial de Calentamiento Global de los Gases de Efecto Invernadero.

Compuesto	Fórmula química	Potencial de Calentamiento Global
Dióxido de Carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	25
Óxido nitroso	N ₂ O	298
CFC-11	CCl ₃ F	4750
CFC-12	CCl ₂ F ₂	10900

CFC-13	CClF_3	14400
CFC-113	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$	6130
CFC-114	$\text{CClF}_2\text{CClF}_2$	10000
CFC-115	CClF_2CF_3	7370
Halon-1301	CBrF_3	7140
Halon-1211	CBrClF_2	1890
Halon-2402	$\text{CBrF}_2\text{CBrF}_2$	1640
Cloruro de Carbono	CCl_4	1400
Bromuro de Metilo	CH_3Br	5
Metil cloroformo	CH_3CCl_3	146
HCFC-22	CHClF_2	1810
HCFC-123	CHCl_2CF_3	77
HCFC-124	$\text{CHClF}_2\text{CF}_3$	609
HCFC-141b	$\text{CH}_3\text{CCl}_2\text{F}$	725
HCFC-142b	CH_3CClF_2	2310
HCFC-225ca	$\text{CHCl}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	122
HCFC-225cb	$\text{CHClF}_2\text{CF}_2\text{CClF}_2$	595
Hidrofluorocarbonos		
HFC-23	CHF_3	14800
HFC-32	CH_2F_2	675
HFC-125	CHF_2CF_3	3500
HFC-134a	CH_2FCF_3	1430
HFC-143a	CH_3CF_3	4470

HFC-152a	CH_3CHF_2	124
HFC-227ea	$\text{CF}_3\text{CHF}_2\text{CF}_3$	3220
HFC-236fa	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_3$	9810
HFC-245fa	$\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	1030
HFC-365mfc	$\text{CH}_3\text{CF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	794
HFC-43-10mee	$\text{CF}_3\text{CHFCHFCF}_2\text{CF}_3$	1640
Compuestos perfluorados		
Hexafluoruro de Azufre	SF_6	22800
Trifluoruro de Nitrogeno	NF_3	17200
PFC-14	CF_4	7390
PFC-116	C_2F_6	12200
PFC-218	C_3F_8	8830
PFC-318	c- C_4F_8	10300
PFC-3-1-10	C_4F_{10}	8860
PFC-4-1-12	C_5F_{12}	9160
PFC-5-1-14	C_6F_{14}	9300
PFC-9-1-18	$\text{C}_{10}\text{F}_{18}$	7500
Pentafluoruro de azufre trifluorometilo	SF_5CF_3	17700
Éteres fluorados		
HFE-125	CHF_2OCF_3	14900
HFE-134	$\text{CHF}_2\text{OCHF}_2$	6320

HFE-143a	CH_3OCF_3	756
HCFE-235da2	$\text{CHF}_2\text{OCHClCF}_3$	350
HFE-245cb2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CHF}_2$	708
HFE-245fa2	$\text{CHF}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$	659
HFE-254cb2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CHF}_2$	359
HFE-347mcc3	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	575
HFE-347pcf2	$\text{CHF}_2\text{CF}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$	580
HFE-356pcc3	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{CHF}_2$	110
HFE-449sl (HFE-7100)	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OCH}_3$	297
HFE-569sf2 (HFE-7200)	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$	59
HFE-43-10-pccc124 (H-Galden 1040x)	$\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OC}_2\text{F}_4\text{OCHF}_2$	1870
HFE-236ca12 (HG-10)	$\text{CH}_2\text{OCF}_2\text{OCHF}_2$	2800
HFE-338pcc13 (HG-01)	$\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{OCHF}_2$	1500
Perfluoropoliéteres		
PFPME	$\text{CF}_3\text{OCF}(\text{CF}_3)$ $\text{CF}_2\text{OCF}_2\text{OCF}_3$	10300
Hidrocarburos y otros compuestos		
Dimetil-éter	CH_3OCH_3	1
Cloruro de metileno	CH_2Cl_2	8.7
Cloruro de metilo	CH_3Cl	13

Anexo 2. Factor de emisión eléctrico.

Este factor de emisión eléctrico se utilizará en esta metodología y se encuentra en la base de datos de Ecoinvent para México.

0.742 kg CO₂eq/kWh

Anexo 3. Factor de emisión específicos para algunos combustibles fósiles.

Fuente: Gasca Ramírez Jorge, Islas Samperio Jorge M., Magdaleno Molina Moisés, Melgarejo Flores Luis A., Palmerín Ruíz María E.- Base de datos de los factores de emisión para el análisis de ciclo de vida de los productos del sector hidrocarburos en México, INDAUTOR, Titular: Universidad Nacional Autónoma de México, No. de registro: 03-2013-06281042180001, 2013.

Factor de Emisión en el Ciclo de Vida para el Gas Natural (gCO₂eq/MJ)

Año	Pozo al Quemador	Combustión	Ciclo de Vida
2010	13.69	55.90	69.59

Factor de Emisión en el Ciclo de Vida para el Gas Licuado de Petróleo (gCO₂eq/MJ)

Año	Pozo al Quemador	Combustión	Ciclo de Vida
2010	13.42	62.10	75.52

Factor de Emisión en el Ciclo de Vida para la Gasolina (gCO₂eq/MJ)

Año	Pozo al Quemador	Combustión	Ciclo de Vida
2010	15.90	70.80	86.70

Factor de Emisión en el Ciclo de Vida para el Diesel (gCO₂eq/MJ)

Año	Pozo al Quemador	Combustión	Ciclo de Vida
-----	------------------	------------	---------------

2010	15.20	74.20	89.40
------	-------	-------	-------

Factor de Emisión en el Ciclo de Vida para la Turbosina (gCO₂eq/MJ)

Año	Pozo al Quemador	Combustión	Ciclo de Vida
2010	14.72	70.8	85.52

Factor de Emisión en el Ciclo de Vida para el Combustóleo (gCO₂eq/MJ)

Año	Pozo al Quemador	Combustión	Ciclo de Vida
2010	14.72	76.10	90.82

Factor de Emisión en el Ciclo de Vida para el Coque de Petróleo (gCO₂eq/MJ)

Año	Pozo al Quemador	Combustión	Ciclo de Vida
2010	14.72	118.7	133.42