



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEL
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS COMO
BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS: ESTUDIO DE
CASO DE UNA EMPRESA FORESTAL EN JALISCO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

MITZI ARIADNA CONTRERAS GALLEGOS

DIRECTOR DE TESIS: DR. CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMENTE

MORELIA, MICHOACÁN

MARZO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 10** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **22 de septiembre del 2017**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Mitzi Ariadna Contreras Gallegos** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **414005226**, con el trabajo titulado: "Análisis de los impactos ambientales del aprovechamiento de residuos como biocombustibles sólidos: Estudio de caso de una empresa forestal en Jalisco" bajo la dirección como **tutor** del Dr. Carlos Alberto García Bustamante.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. Omar Masera Cerutti
Vocal: Dr. Alfredo Fernando Fuentes Gutiérrez
Secretario: Dr. Carlos Alberto García Bustamante
Suplente: Dr. José Núñez González
Suplente: Mtro. Luis Bernardo López Sosa

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 08 de marzo del 2018.



DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la UNAM y a la ENES Morelia, por permitirme realizar mis estudios de licenciatura y por proporcionarme las herramientas necesarias para mi formación personal y académica; así como a los contribuyentes por financiar mi educación superior.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, quien a través de los proyectos “Estudio de viabilidad, barreras e impactos de opciones de aprovechamiento de recursos forestales para energía renovable” (ENERFOR), con clave CONACYT-SENER 2013-05 219797; y “Clúster de Biocombustibles Sólidos para generación térmica y eléctrica”, con clave CONACYT-SENER 246911, financió esta tesis.

Al Dr. Carlos García, por su inigualable apoyo, guía y por compartir conmigo sus conocimientos y pasión por la investigación a lo largo de mi carrera universitaria y durante mi proceso de titulación.

Al Dr. Omar Masera, por cada uno de los aprendizajes compartidos durante la licenciatura, así como por todo el apoyo brindado desde mi estancia de investigación y en mi participación dentro del proyecto ENERFOR.

Al M.C. Alfredo Fuentes, por formar parte importante de mi formación personal y académica, así como por sus valiosas contribuciones en este proyecto.

Al M.C. Bernardo Sosa, por contagiarme de su pasión y compromiso con el medio ambiente, así como por sus apreciables aportes para este trabajo.

Al Dr. José Núñez, por su apoyo en el uso del software SimaPro, así como por sus valiosas contribuciones en esta tesis.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Al Ing. Jesús Aguirre y a Andrés Holzleitner, por la confianza depositada en mí, por su disposición y por el interés en este trabajo, ya que sin ellos esta tesis no hubiera sido posible.

Al M. C. Daniel Cohen, por su infinita paciencia, así como por su valioso e inigualable apoyo desde el inicio de mi estancia de investigación y durante mi proceso de titulación.

A la Blga. Tere Arias y al Dr. Enrique Riegelhaupt, por su orientación y por compartir su invaluable conocimiento y pasión en el ámbito de la bioenergía conmigo.

Al Dr. Ricardo Musule, por su apreciable apoyo en campo, su amistad y por sus aportaciones a este trabajo, así como al equipo del laboratorio de Ecotecnología de la ENES Morelia.

A mi mamá, por creer siempre en mí, por el apoyo incondicional, por todo el amor y el cariño, por ser mi fortaleza y por estar conmigo en los momentos más difíciles.

A Jessi, por su paciencia, amor e inspiración para lograr lo inalcanzable.

A mi familia, especialmente a Danilo y a mis abuelos Eva y Jesús, por educarme y cuidarme con tanto amor.

A mis amigos de la LCA, particularmente a Victoria, Ana, Carla, Michelle y César, por el humor, la amistad y por contribuir en mi formación personal y académica.

Contenido

Resumen.....	12
Capítulo 1. Introducción.....	14
1.1 Caso de estudio	17
1.2 Pregunta de investigación	19
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Justificación de la investigación	20
Capítulo 2. Marco teórico	23
2.1 Antecedentes de la investigación.....	23
2.2 Marco teórico-conceptual.....	24
2.2.1 La bioenergía y la generación de calor	24
2.2.2 La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	27
2.2.3 Sistema de variables	33
Capítulo 3. Marco metodológico	40
3.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	40
3.1.1 Definición de objetivo y alcance	41
3.1.2 Supuestos y consideraciones	46
3.1.3 Criterios de asignación.....	47
3.1.4 Impactos a evaluar.....	47
3.1.5 Métodos de evaluación de impacto	50

3.2 Análisis de sensibilidad	53
Capítulo 4. Resultados.....	54
4.1 Análisis de inventario	54
4.2 Evaluación de impactos	57
4.2.1 Cambio climático	57
4.2.2 Agotamiento de ozono	62
4.2.3 Formación de oxidantes fotoquímicos	63
4.2.4 Tasa de Retorno Energético (TRE)	64
4.2.5 Resumen de indicadores.....	65
4.3 Análisis de sensibilidad	67
Capítulo 5. Discusión.....	69
5.1 Cambio Climático	69
5.2 Potencial de agotamiento de la capa de ozono	70
5.3 Formación de oxidantes fotoquímicos	71
5.4 Tasa de Retorno Energético.....	72
Capítulo 6. Conclusiones Finales.....	75
Referencias.....	78

Índice de Figuras

Figura 1. Producción anual de la EF	18
Figura 2. Marco metodológico general para ACV	28
Figura 3. Impactos y áreas de protección	31
Figura 4. Métodos de evaluación de impacto publicados desde el 2000.....	32
Figura 5. Límites del sistema	45
Figura 6. Diagrama de flujos de energía del sistema	57
Figura 7. Contribución a la categoría de Cambio Climático por BCSF	58
Figura 8. Carbón Vegetal: Emisiones de GEI por etapa del ciclo de vida.....	59
Figura 9. Astilla Combustible: Emisiones de GEI por etapa de ciclo de vida	60
Figura 10. Aserrín: Emisiones de GEI por etapa de ciclo de vida	60
Figura 11. Emisiones de GEI reportadas por etapa por BCSF	61
Figura 12. Potencial de agotamiento de la capa de ozono por BCSF	63
Figura 13. Formación de oxidantes fotoquímicos por BCSF	63
Figura 14. Tasa de Retorno Energético por BCSF.....	64
Figura 15. Carbón Vegetal: Impactos estimados por etapa de ciclo de vida.....	65
Figura 16. Astilla combustible: Impactos estimados por etapa de ciclo de vida	66
Figura 17. Aserrín: Impactos estimados por etapa de ciclo de vida	67
Figura 18. Análisis de sensibilidad: Cambio Climático	68
Figura 19. Análisis de sensibilidad: Uso de energía	68
Figura 20. Comparación del factor de emisión de diferentes combustibles	69
Figura 21. Potencial de FOF de varios combustibles	72
Figura 22. Tasa de retorno energético para varias fuentes energéticas	73
Figura 23. Datos de series temporales de la TRE para diferentes países	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Categorías de impacto analizadas en ACVs de biocombustibles	34
Tabla 2. Sistema de variables	35
Tabla 3. Categorías de impacto e indicadores a evaluar	48
Tabla 4. Categorías de impacto de diferentes métodos de punto medio	51
Tabla 5. Métodos de caracterización de punto medio	52
Tabla 6. Análisis de inventario: procesos e insumos.....	54
Tabla 8. Emisiones de GEI por BCSF	61
Tabla 9. Potencial de FOF de varios combustibles.....	72

Lista de unidades y acrónimos

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
AF	Aprovechamiento Forestal
BCSF	Biocombustibles Sólidos Forestales
C₂H_{4e}	Etileno equivalente
CC	Contaminantes Criterio (incluye O ₃ , PM, CO, NO ₂ , SO ₂ , Pb)
CFC	Clorofluorocarbonos
CH₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
CO_{2e}	Dióxido de Carbono equivalente
ENERFOR	Estudio de viabilidad, barreras e impactos de opciones de aprovechamiento de recursos forestales para energía renovable
EF	Empresa Forestal
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ISO	Organismo Internacional para la Normalización
kWh	Kilowatt hora
m³a	Metro cúbico aparente
m³r	Metro cúbico rollo
MJ	Megajoule
NH₃	Amoniaco

NMVOC	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos
NO_x	Óxidos de Nitrógeno
N₂O	Óxido nitroso
O₃	Ozono
OF	Oxidantes Fotoquímicos
PAH	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
PAO	Potencial de Agotamiento de Ozono
PM	Materia Particulada
PJ	Petajoule
SENER	Secretaría de Energía
SO₂	Dióxido de Azufre
TE	Transportador Energético
tMS	Toneladas de materia seca
TRE	Tasa de Retorno Energético

Resumen

El uso intensivo de hidrocarburos ha generado diversas repercusiones ambientales, sociales y económicas. Es por ello que las fuentes renovables de energía han cobrado especial relevancia, entre las que destaca la bioenergía, particularmente aquella obtenida de la biomasa forestal debido a su gran potencial en México. Si se pretenden obtener beneficios derivados de la bioenergía, y que esta sea una fuente renovable, los biocombustibles deben ser estrictamente producidos bajo criterios de sustentabilidad. Por lo anterior, cobra especial relevancia analizar las cadenas productivas del aprovechamiento de la biomasa para fines energéticos.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los impactos ambientales potenciales del aprovechamiento de los residuos como biocombustibles sólidos forestales (BCSF) de una empresa localizada en el estado de Jalisco, México. Para ello se desarrolló un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para tres BCSF: astilla combustible, aserrín y carbón vegetal. Estos fueron analizados bajo cuatro categorías de impacto: cambio climático, agotamiento de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos y uso de energía. Para la fase del ACV de *evaluación de impactos* se empleó el software SimaPro 8.3 y el método CML-IA. La unidad funcional fue definida como 1 MJ de energía generado por el biocombustible en cuestión.

En lo referente a la categoría de cambio climático, el BCSF que tuvo una mayor contribución fue el carbón vegetal con 47.2 gCO_{2e}/MJ, seguido por la astilla con 5.4 gCO_{2e}/MJ y el aserrín con 3.5 gCO_{2e}/MJ. Para el agotamiento de ozono, se estimó para el aserrín un factor de 1.02E⁻⁶ gCFC_{-11e}/MJ, para la astilla de 7.7E⁻⁷ gCFC_{-11e}/MJ y para el carbón vegetal de 5.5E⁻⁷ gCFC_{-11e}/MJ. El carbón vegetal es el BCSF que mayor potencial de formación de oxidantes fotoquímicos genera al emitir 0.2 gC₂H_{4e}/MJ, seguido por la astilla con 0.003 gC₂H_{4e}/MJ y el aserrín con 0.002 gC₂H_{4e}/MJ. En lo que respecta al uso de energía, el biocombustible forestal que presentó la Tasa de Retorno Energético (TRE) más alta fue el aserrín con 29:1, seguido por el carbón vegetal con 28:1 y la astilla con 23:1.

Se concluye que el BCSF que tuvo un mejor desempeño ambiental fue el aserrín ya que presentó el menor factor de emisión para la mayoría de los impactos analizados. De acuerdo al análisis de sensibilidad, para las categorías de Cambio Climático y Uso de Energía, se determinó que, a mayor contenido de humedad de la materia prima, mayor será el factor de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por MJ y menor la TRE. Finalmente, en lo que al impacto ambiental refiere, los BCSF analizados presentan mayores ventajas en términos de mitigación de GEI en comparación con las fuentes fósiles, bajo el supuesto de que el manejo forestal se lleva a cabo bajo criterios de sustentabilidad, donde los combustibles fósiles tienen emisiones que van desde alrededor de 70 a 110 gCO_{2e}/MJ. El trabajo sugiere que los BCS constituyen una alternativa potencial para contribuir a la descentralización del sistema energético nacional con bajas emisiones de GEI.

Abstract

The intensive use of hydrocarbons has generated diverse environmental, social and economic repercussions. As a result, renewable energies have gained special relevance, among which bioenergy stands out, particularly the one obtained from forest biomass, due to their great potential in Mexico. In order to obtain benefits from bioenergy, biofuels must be strictly produced under criteria of sustainability. Therefore, it is highly important to analyze the productive chains of the use of biomass for energy purposes.

The objective of this thesis is to analyze the potential environmental impact of using waste of a forest company as Solid Biofuels (BCSF) in the state of Jalisco, Mexico. To do this, a Life Cycle Assessment (LCA) was developed for three BCSF: wood chips, sawdust and charcoal. These were analyzed under four impact categories: climate change; ozone depletion potential; formation of photochemical oxidants; and energy use. The SimaPro 8.3 software and the CML-IA method were used to evaluate the mentioned categories. The functional unit was defined as 1 MJ of energy generated by the biofuel in question.

Regarding the climatic change category, the BCSF with the greatest contribution was the charcoal with an emission factor of 47.2 gCO_{2e}/MJ, followed by the wood chips with 5.4 gCO_{2e}/MJ and, finally, the sawdust with 3.5 gCO_{2e}/MJ. For the ozone depletion potential, a factor of 1.02E⁻⁶ gCFC_{11e}/MJ was estimated for the sawdust, 7.7E⁻⁷ gCFC_{11e}/MJ for the wood chips and 5.4E⁻⁷ gCFC_{11e}/MJ for the charcoal. Charcoal is the BCSF that generates the greatest photochemical oxidant formation potential emitting 0.2 gC₂H_{4e}, followed by the wood chips with 0.003 gC₂H_{4e}/MJ and the sawdust with 0.002 gC₂H_{4e}/MJ. Regarding the use of energy, the forest biofuel that presented the highest energy return on investment (EROI) was the sawdust with 29:1, followed by the charcoal with 28:1 and wood chips with 23:1.

The conclusion is that the biofuel with the best environmental performance was the sawdust, since it presented the lowest emission factor for the majority of the different impact categories. According to the sensitivity analysis, for the categories of Climate Change and Energy Use, it was determined that, the higher the moisture content of the biomass, the higher the Greenhouse Gases (GHG) emission factor per MJ and the lower the EROI. Finally, environmentally speaking, the BCSF analyzed have greater advantages, in terms of GHG mitigation, compared to fossil fuels, under the assumption that forest management is carried out under criteria of sustainability, where fossil fuels have emissions ranging from 70 to 110 gCO_{2e}/MJ. This work suggests that BCSF is then a potential alternative to contribute to the decentralization of the national energy system with low GHG emissions.

Capítulo 1. Introducción

La demanda energética, tanto a nivel mundial como nacional, se ha incrementado significativamente en las últimas décadas debido principalmente al crecimiento exponencial de la población. Dicha demanda ha sido, en su mayoría, satisfecha a través del uso de hidrocarburos, lo cual ha generado una serie de impactos ambientales, sociales y políticos. No obstante, las reservas convencionales de combustibles fósiles, las mayores fuentes de energía primaria, han ido disminuyendo considerablemente. Así pues, ante la serie de efectos negativos y el posible agotamiento de dichos combustibles, otras fuentes alternativas de energía han cobrado relevancia.

La principal repercusión ambiental de la quema y el uso intensivo de hidrocarburos, a nivel global, es el incremento del 40% de las emisiones y concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) presentes en la atmósfera desde los tiempos preindustriales (IPCC, 2013), contribuyendo al fenómeno del cambio climático, y a otros problemas ambientales y de salud humana.

Entre los efectos ambientales negativos destacan el aumento de las concentraciones de GEI (García et al., 2013; IPCC, 2011) y contaminantes criterio en la atmósfera, la contaminación de los mantos acuíferos y del suelo, el agotamiento de las reservas de petróleo (García et al., 2013), así como diferentes afectaciones a la biodiversidad (IPCC, 2002).

Como es el caso de muchos otros países, la matriz energética de México está altamente concentrada en los hidrocarburos. Tal es el grado de centralización hacia las fuentes fósiles que, para el año 2015, éstas contribuyeron con el 87.2% de la producción nacional total de energía primaria, la cual fue de alrededor de 8,261 PJ

(SENER, 2016). El uso intensivo de dicha fuente de energía ha generado repercusiones en el ámbito social y económico del país. En el año de 1987, México importaba poco menos del 2% del petróleo que consumía y, para 2007, la cifra aumentó a un 30% (OLADE, 2008). El incremento en las importaciones petroleras pone en riesgo la seguridad energética del país, al ser los hidrocarburos las fuentes energéticas principales a nivel nacional.

Ante dicho contexto, la extracción de hidrocarburos, en términos ambientales y económicos, se ha vuelto cada vez más compleja y costosa en las últimas décadas, haciendo sumamente necesario promover fuentes energéticas alternativas para contribuir a satisfacer la demanda nacional. En ese sentido, se ha venido postulando una transición energética hacia sistemas más equitativos, mejor distribuidos geográficamente y menos contaminantes (Masera et al., 2011), y en la que se reconoce la importancia de las fuentes renovables de energía (Donald, 2005). Éstas últimas pueden contribuir al desarrollo social y económico, ayudar a acelerar el acceso a la energía, contribuir a la seguridad energética, así como mitigar las concentraciones de GEI en la atmósfera y la contaminación en espacios naturales (IPCC, 2011).

Una de las fuentes renovables de energía con mayor potencial para facilitar la transición en nuestro país es la bioenergía (Masera et al., 2004). Esta es la obtenida a partir de la biomasa, es decir, de la materia constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos (Masera et al., 2011). La biomasa es el resultado de la conversión fotosintética de la energía solar y el dióxido de carbono (CO₂) a los componentes químicos y físicos de la materia vegetal, los cuales, posteriormente se convierten en mecanismos de almacenamiento que permiten que la energía solar se transfiera a través de sistemas animales, vegetales, humanos e industriales (Donald, 2005).

A partir de la biomasa se pueden obtener biocombustibles, los cuales son el portador energético que transporta energía solar almacenada como energía química (Van Loo & Koppejan, 2008). Es decir, los biocombustibles son la biomasa vegetal y los productos refinados que serán quemados para obtener energía, ya sea en forma de electricidad o calor (Guo et al., 2015).

En México, en el año 2015 la biomasa representó únicamente el 4.36% de la producción de energía primaria, es decir, 359.84 PJ y un 5.7% del consumo energético total nacional (SENER, 2016), donde fue utilizada principalmente para la cocción de alimentos en zonas rurales y periurbanas, y como combustible en la industria azucarera. No obstante, se ha estimado que dicha fuente energética tiene un potencial de hasta 3,569 PJ al año en aplicaciones modernas y más eficientes (Johnson et al., 2009) (SENER, s.f.).

Los bosques y selvas nativos son una fuente de biomasa de suma relevancia en el país. México cuenta con una superficie total de 196,437,500 ha, de la cual el 72% corresponde a área forestal (García & Masera, 2016). Adicionalmente, la industria forestal en el país presenta volúmenes significativos de residuos de monte e industria que podrían ser aprovechados para la producción de energía a diferentes escalas. Johnson y colaboradores (2009) estiman que la biomasa forestal podría proveer entre 1,400 y 2,400 PJ al año en México. Por su parte, otros autores proponen que ésta tiene un potencial de entre 1,135 y 1,923 PJ anuales (Masera et al., 2011; García et al., 2015).

En ese sentido, se considera que la biomasa, particularmente la forestal, es una fuente de energía que podría contribuir en gran medida a descentralizar la matriz energética. No obstante su potencial, dicha fuente renovable no está siendo empleada de manera significativa en aplicaciones industriales o en la generación eléctrica a nivel nacional.

1.1 Caso de estudio

En el Estado de Jalisco, se localiza una de las empresas mexicanas privadas dedicadas a la producción de biocombustibles sólidos como subproductos de la actividad forestal. Por cuestiones de confidencialidad y privacidad de la información de dicha empresa, su nombre será omitido en el presente trabajo y se identificará con la clave EF.

La EF fue seleccionada en el marco del proyecto “Estudio de viabilidad, barreras e impactos de opciones de aprovechamiento de recursos forestales para energía renovable” (ENERFOR), realizado por un equipo de académicos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Dicho trabajo tuvo como objetivo identificar opciones viables de producción de biocombustibles forestales, así como caracterizar y cuantificar las barreras existentes para el desarrollo e implementación de éstas (Masera et al., 2017). Para lo anterior, se seleccionaron, de una muestra de 58 empresas forestales, 12 con posibilidad técnica de producir Biocombustibles Sólidos Forestales (BCSF) con base en dos tipos de indicadores (Ibíd.):

1. *Indicadores de precondition.* Es decir, aquéllos que no corresponden con las capacidades técnicas de la empresa, tales como: disposición a vender BCSF, transparencia, administración y gobernanza.
2. *Indicadores de factibilidad técnica.* Los cuales son los basados en aspectos y capacidades técnicas de la empresa, como fueron: cantidad de BCSF disponibles y potenciales, accesibilidad física y experiencia con BCSF.

Así pues, la EF a analizar en el presente trabajo fue una de las empresas que presentaron mayor puntaje de acuerdo a los indicadores previamente mencionados. La EF se dedica principalmente a la producción de madera aserrada y muebles, sin embargo, ENERFOR reporta los siguientes transportadores energéticos forestales en su cadena productiva: carbón vegetal, astilla y aserrín. La EF produce anualmente un total de 3,000 m³ a de astilla con corteza para la industria tequilera, 1000 m³a de aserrín para ladrilleras aledañas, 2,800 m³ de escuadría para fabricación de muebles y 400 toneladas de carbón vegetal para un ingenio azucarero (ver Figura 1).

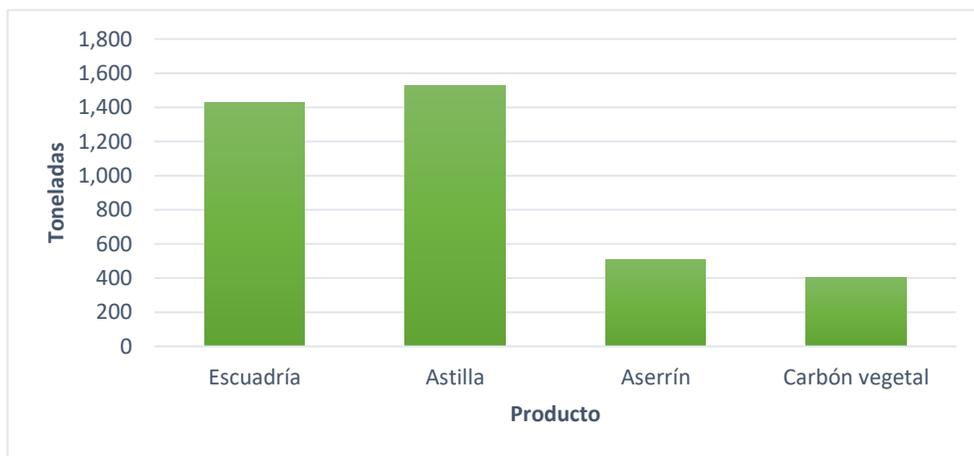


FIGURA 1. PRODUCCIÓN ANUAL DE LA EF
(Fuente: Elaboración propia)

Como puede observarse, la empresa cuenta ya con experiencia produciendo y comercializando biocombustibles. No obstante, para desarrollar cadenas energéticas sustentables, se considera indispensable analizar los impactos ambientales potenciales del aprovechamiento de la biomasa para fines energéticos.

1.2 Pregunta de investigación

De acuerdo con el contexto anteriormente planteado, la presente investigación pretende responder a la siguiente pregunta:

¿Cuáles son los impactos ambientales potenciales del aprovechamiento de los residuos forestales de la EF como biocombustibles sólidos?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar los impactos ambientales potenciales del aprovechamiento de los residuos forestales de la EF como biocombustibles sólidos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar el ciclo de vida de los tres biocombustibles producidos actualmente por la EF: astilla, aserrín y carbón vegetal.

- Analizar las siguientes categorías de impacto en las tres cadenas productivas:
 - Cambio climático
 - Agotamiento de ozono
 - Formación de oxidantes fotoquímicos
 - Uso de energía

1.4 Justificación de la investigación

Pese a que se considera que no hay emisiones netas de CO₂ en la atmósfera provenientes de la quema de la biomasa cuando esta se obtiene a partir de un manejo sustentable de los bosques, sí hay emisiones adicionales, tanto de GEI como de otros contaminantes, a lo largo del ciclo de vida de la producción de los biocombustibles debido al aprovechamiento forestal, el transporte, la conversión del insumo, así como por los cambios de uso de suelo requeridos, en el caso en plantaciones energéticas (Masera et al., 2011). De acuerdo a las circunstancias y a los procesos del ciclo de vida del biocombustible, este balance puede ser positivo o negativo, lo que determina el impacto de los BCS como mitigadores de emisiones de GEI con respecto a las fuentes fósiles (Ibíd.). En ese sentido, si se pretenden obtener beneficios derivados de la bioenergía, y que ésta sea considerada una fuente renovable, los biocombustibles deben ser estrictamente producidos bajo criterios de sustentabilidad.

Entre los beneficios procedentes del uso de la bioenergía destacan los siguientes (Van Loo & Koppejan, 2008; Islas et al., 2007; Masera et al., 2004; IRENA, 2017):

- **Beneficios políticos**, tales como la reducción de la dependencia a los hidrocarburos importados y a la diversificación de la matriz energética nacional, aumentando así la seguridad energética del país.
- **Beneficios económicos**, como la generación de nuevas fuentes de empleos a escala local (se estima que la producción de biocombustibles crea 20 veces más empleos locales, especializados y no especializados, que la de carbón y petróleo). En comparación con otras fuentes renovables de energía, se ha analizado que, a nivel mundial, la producción de biocombustibles líquidos es la segunda

fuentes de empleos (generando aproximadamente 1,724,000 empleos directos e indirectos), los biocombustibles sólidos la quinta (con 723,000 empleos) y el biogás la sexta fuente (produciendo 333,000). A lo anterior, se le suman los beneficios económicos derivados de las inversiones en el medio rural y la redistribución del ingreso nacional.

- **Beneficios ambientales**, tales como la mitigación de las emisiones de GEI, la reducción de la lluvia ácida, la regulación del ciclo hidrológico, el mejoramiento de los suelos y el suministro de hábitat para fauna silvestre. Además, la conversión de desechos orgánicos en combustible reduce los daños ambientales asociados a su inadecuada disposición.
- **Beneficios sociales**, ya que la producción y uso de la bioenergía puede contribuir a la apropiación de tecnologías energéticas emergentes, empoderando a pobladores, particularmente en zonas rurales y mejorando el acceso a energía en zonas donde no la hay.

No obstante sus potenciales ventajas, se ha cuestionado la sustentabilidad ambiental de los biocombustibles debido a los posibles impactos negativos de la expansión de cultivos energéticos sobre los bosques, la mitigación de emisiones, y otras consideraciones que necesitan ser aún más estudiadas en cada caso en particular (Masera et al., 2011). En ese sentido, para poder asegurar que algún biocombustible es sustentable y está teniendo impactos positivos en las diferentes esferas, es indispensable analizar el balance energético, económico y de emisiones de GEI a lo largo de su ciclo de vida, ya que, si la producción de bioenergía no se lleva a cabo con los debidos cuidados y su uso es ineficiente, se pueden tener impactos negativos (Ibíd.).

Así pues, si se pretende evaluar los impactos ambientales potenciales del uso de bioenergía, para asegurar así los beneficios derivados de ésta, cada fase de su ciclo de vida debe de ser analizada para garantizar los beneficios anteriormente mencionados. Para lo anterior se recomienda desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), el cual es una evaluación que incluye las diversas etapas del ciclo de vida de la biomasa, en las cuales los intercambios con el entorno, en términos de emisiones al aire, suelo y agua se recopilan para posteriormente estimar los potenciales impactos ambientales en cuestión (Van Loo & Koppejan, 2008). Para poder desarrollar un ACV de algún biocombustible, e identificar así los impactos ambientales potenciales subsecuentes, es necesario primero caracterizar la cadena productiva del mismo.

En ese sentido, se pretende que, a través de la investigación, una vez definida la cadena productiva, se identifiquen aquellas etapas del proceso que presenten los mayores impactos potenciales para el ambiente. Esto permitirá determinar opciones de mejora para las diferentes categorías a analizar. Así, al identificar puntos clave en las etapas del ciclo de vida de la producción de biocombustibles, es posible entender mejor los impactos negativos y proponer acciones para potenciar los beneficios y ventajas provenientes del uso de la bioenergía.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

Uno de los trabajos más destacados a nivel nacional para analizar la viabilidad energética forestal del país, así como por explorar las cadenas productivas de biocombustibles sólidos y las posibles barreras en su implementación ha sido el proyecto denominado “Estudio de viabilidad, barreras e impactos de opciones de aprovechamiento de recursos forestales para energía renovable” (ENERFOR). Dicho estudio está siendo realizado por el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) y la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES Morelia) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y de la Secretaría de Energía (SENER).

El proyecto ENERFOR tiene como objetivo principal identificar opciones de producción de biocombustibles forestales a nivel local o micro regional, que sean técnica y económicamente viables a escala de empresas forestales; así como caracterizar y cuantificar las barreras existentes para el desarrollo e implementación de dichas opciones (Maser et al., 2017). En el proyecto se analizaron 28 empresas forestales a nivel nacional, de las cuales se seleccionaron 12 en base a criterios de tipo técnico-organizativo, tales como: área forestal manejada, volúmenes (autorizado y aprovechado) y posibilidad energética, así como experiencia e interés para producir combustibles forestales. Entre las empresas seleccionadas en el proyecto ENERFOR se encuentra la EF a analizar en el presente trabajo.

2.2 Marco teórico-conceptual

2.2.1 La bioenergía y la generación de calor

Para efectos de esta investigación, un biocombustible será definido como un transportador energético (TE), referido a la biomasa vegetal o a los productos refinados que serán quemados para obtener energía en forma de luz o calor (Guo, Song, & Buhain, 2015). Estos pueden dividirse en gaseosos, líquidos y sólidos. Los últimos son los que serán analizados en esta investigación, particularmente aquéllos producidos a partir de material forestal.

Los productos forestales que se consideran relevantes discutir en el marco de éste proyecto son:

- *Astilla*: trozo de madera de pequeñas dimensiones (Lesme & Oliva, 2010) que queda después de la generación de productos forestales en la industria del procesamiento de la madera (FAO, 2016).
- *Aserrín*: Residuo lignocelulósico proveniente del proceso de aserrío de madera que, en su estado natural, tiene un contenido de humedad entre el 20% y el 50%, y una densidad de 0.12 t/m³ (Masera et al., 2011).
- *Carbón Vegetal*: Madera carbonizada por la combustión parcial o la aplicación de calor de fuentes externas (FAO, 2016); puede tener diferentes usos, entre los cuales destaca el energético. En México, el carbón vegetal se produce con madera proveniente de varias fuentes incluyendo leña de cambios de uso del suelo, del manejo de la regeneración de árboles como el encino y otros en bosques naturales, y de plantaciones forestales (Masera et al., 2011). Para el caso del sistema a analizar en el presente trabajo, este BCSF es producido a partir de madera de encino.

- **Escuadría:** Madera rolliza destinada a la producción de tablas y tablonés, vigas, material de empaque y cuadrados para herramienta, principalmente (SEMARNAT, 2014).

Por su parte, los conceptos considerados relevantes para analizar los procesos relacionados con el aprovechamiento de la biomasa para la generación de calor son:

Materia prima: Ésta es la biomasa a partir de la cual se generará energía. En general, los recursos de biomasa para fines energéticos comprenden una variada gama de fuentes primarias (aquéllas en que la biomasa se obtiene específicamente para producción de energía), y secundarias (las fuentes en las que la biomasa es un subproducto de otras actividades económicas) (García & Masera, 2016). Para esta investigación, la materia prima a utilizar será de fuentes secundarias ya que los residuos forestales son los derivados del aprovechamiento y la transformación industrial de la madera (Ibíd.).

Entre las propiedades y características de la materia prima, las más importantes para la producción de bioenergía son su poder calorífico, contenido de humedad, homogeneidad y contenido de cenizas. Dichas cualidades tendrán un impacto en el costo de la materia prima por unidad de energía producida, transporte, pre tratamiento y costos de almacenamiento, así como en su idoneidad para alguna tecnología de conversión (IRENA, 2012). Dichas propiedades influirán de manera significativa en las emisiones de GEI producidas durante el ciclo de vida del biocombustible, así como en la energía requerida para el procesamiento de la materia prima.

Conversión energética: Ésta es la capacidad de un biocombustible para promover cambios o acciones, tales como calor o movimiento. En el caso de la biomasa, el

proceso de combustión es la principal ruta tecnológica para la producción de bioenergía. (Van Loo & Koppejan, 2008)

Tecnologías de combustión: Son aquellas tecnologías que pueden usar biomasa como combustible y, por tanto, en las que se llevará a cabo la etapa de uso final, dado que en éstas ocurre el proceso de combustión. Ésta última fase emite gases a la atmósfera que pueden generar impactos a diferentes escalas según sea la composición de los biocombustibles. A nivel local pueden producirse afectaciones debido a la emisión de partículas y otros componentes; a escala regional las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxidos de azufre (SO_2) pueden ocasionar lluvia ácida y, a nivel global, se puede contribuir al cambio climático por las emisiones de GEI y al agotamiento de la capa de ozono (Ibíd.).

Las emisiones producidas durante la combustión dependerán principalmente de la tecnología, las condiciones durante el proceso de combustión y las medidas de reducción de emisiones primarias y secundarias que se hayan implementado (Van Loo & Koppejan, 2008). Según su causa, las emisiones de las aplicaciones de combustión de biomasa pueden ser de dos tipos (Ibíd.):

- *Emisiones provenientes de la combustión completa.* Los gases producidos por un proceso de combustión completa son: el dióxido de carbono (CO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el óxido nitroso (N_2O), los óxidos de azufre (SO_x) y el cloruro de hidrógeno (HCl).
- *Emisiones provenientes de la combustión incompleta,* las cuales se originan como resultado de alguna de las siguientes condiciones:
 - Mezcla inadecuada de aire y combustible en la cámara de combustión, lo cual produce zonas de combustión locales ricas en combustible
 - Ausencia general de oxígeno disponible

- Temperaturas de combustión muy bajas
- Tiempos de residencia muy cortos
- Concentraciones de radicales muy bajas

Entre los gases producidos en dichas circunstancias se encuentra el monóxido de carbono (CO), el metano (CH₄), los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC), los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), las partículas, las dioxinas policloradas y furanos, el amoníaco (NH₃) y el ozono (O₃).

2.2.2 La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Como se mencionó previamente, es de suma importancia analizar el balance energético, económico y de emisiones de GEI a lo largo del ciclo de vida de los biocombustibles para evitar tener impactos ambientales negativos (Masera et al., 2011). Por lo anterior, las metodologías para evaluar la sustentabilidad y los impactos ambientales y sociales generados por un producto o servicio cobran gran relevancia. Un ejemplo de dichas metodologías es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), el cual se refiere al proceso de recopilar y evaluar las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema-producto durante su ciclo de vida (ISO, 2006).

El método de ACV se desarrolló en Estados Unidos, alrededor de 1950 y 1960 en el sector gubernamental para controlar el gasto público. Inicialmente, ésta fue una herramienta utilizada para mejorar la administración del presupuesto vinculando la funcionalidad al costo total de propiedad. Rápidamente el concepto de ciclo de vida se expandió al sector privado (Huppés & Curran, 2012).

La Organización Internacional para la Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) ha establecido una serie de estándares y normas para los reportes de ACV, los cuales están referidos en la serie ISO 14040 (Heijungs & Guinée, 2012). De acuerdo con dicha ISO, las etapas de las que consta un ACV son las siguientes (ver Figura 2):

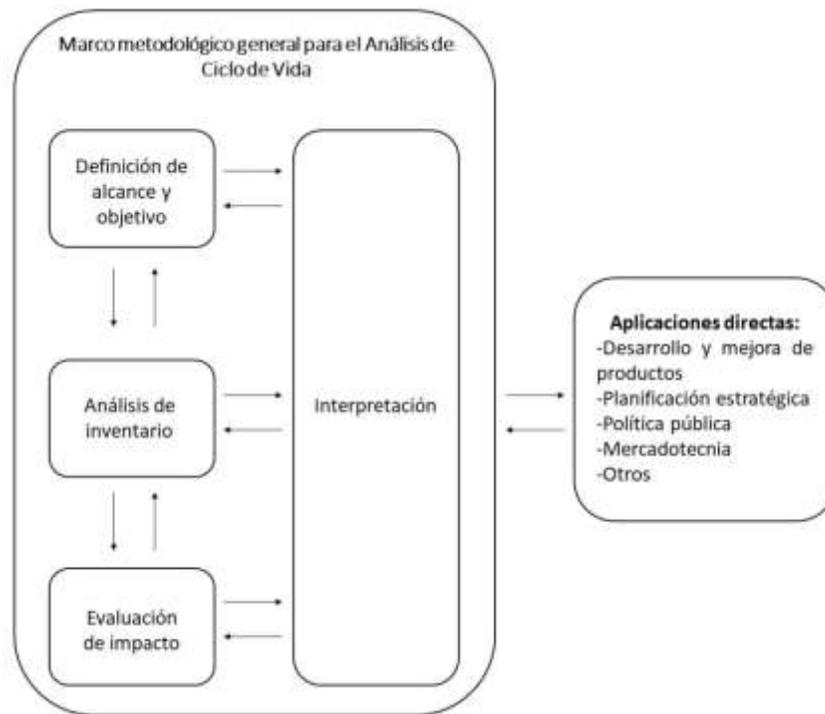


Figura 2. Marco metodológico general para ACV
(Fuente: ISO, 2006)

1. **Definición del alcance y objetivos.** Los reportes de ACV inician con la definición del objetivo del estudio, es decir, la razón por la cual el análisis se llevará a cabo. Adicionalmente, dicha sección enmarca y esboza el análisis en términos de (Hauschild M. Z., 2018):

- Definir una unidad funcional, es decir, una descripción cuantitativa de la función del producto o servicio del análisis. Dicha unidad será

la referencia con la que las entradas y salidas de energía y materia puedan relacionarse en la siguiente fase del ACV.

- Concretar el alcance del sistema-producto, delimitando las actividades y procesos del ciclo de vida.
- Seleccionar los límites geográficos y temporales relevantes para los procesos de nuestro sistema-producto.
- Decidir la perspectiva que tendrá el análisis, la cual puede ser consecuencial o atribucional. La primera hace referencia a los estudios en los que los impactos se consideran una consecuencia de elegir una alternativa sobre otra. En cambio, los ACVs atribucionales son aquéllos en los que la evaluación de los impactos se asocia con la actividad estudiada.

2. **Análisis de inventario.** En esta fase del ACV se recopila la información referente a los flujos de entrada de materiales, semi-productos y productos, así como de salida de emisiones, residuos y productos para el sistema (Ibíd.). El análisis de inventario se construye con base en la unidad funcional definida en la etapa previa (Heijungs & Guinée, 2012). Así pues, el resultado de esta fase del ACV es el *inventario de ciclo de vida*, el cual es una serie de datos que cuantifica los flujos físicos elementales del sistema-producto con base en la unidad funcional (Hauschild M. Z., 2018).

3. **Evaluación de impacto.** Ésta fase del ACV tiene como objetivo entender y evaluar la magnitud y el significado de los impactos ambientales potenciales para un sistema-producto durante su ciclo de vida (Heijungs & Guinée, 2012). La evaluación de impacto consta de cinco elementos, de los

cuales, de acuerdo con la ISO 14040, los primeros tres son obligatorios (Hauschild M. Z., 2018):

- Selección de las *categorías de impacto*, las cuales son definidas como una clase que representa un tema ambiental de interés, al cual, los resultados del análisis de inventario serán asignados (ISO, 2006).
- *Clasificación* de los flujos elementales provenientes del inventario en categorías de impacto según su habilidad para contribuir impactando algún indicador. Éste último es la representación cuantificable de las categorías de impacto (Ibíd.).

Las categorías de impacto pueden tener indicadores de punto medio ("*midpoint indicator*") o de punto final ("*endpoint indicator*"). Éstas últimas hacen referencia al atributo o al aspecto del ambiente natural, la salud humana o los recursos, que son de preocupación o interés al presentar algún impacto o problema ambiental (ISO, 2006). Al conjunto de categorías de punto final que son valiosas para la sociedad se le denomina *área de protección* (Hauschild & Hujibregts, 2015). Por su parte, los indicadores de categoría de punto medio son aquéllos ubicados en algún lugar a lo largo de la ruta de impacto entre la emisión y la categoría de punto final (Ibíd.) (ver Figura 3).

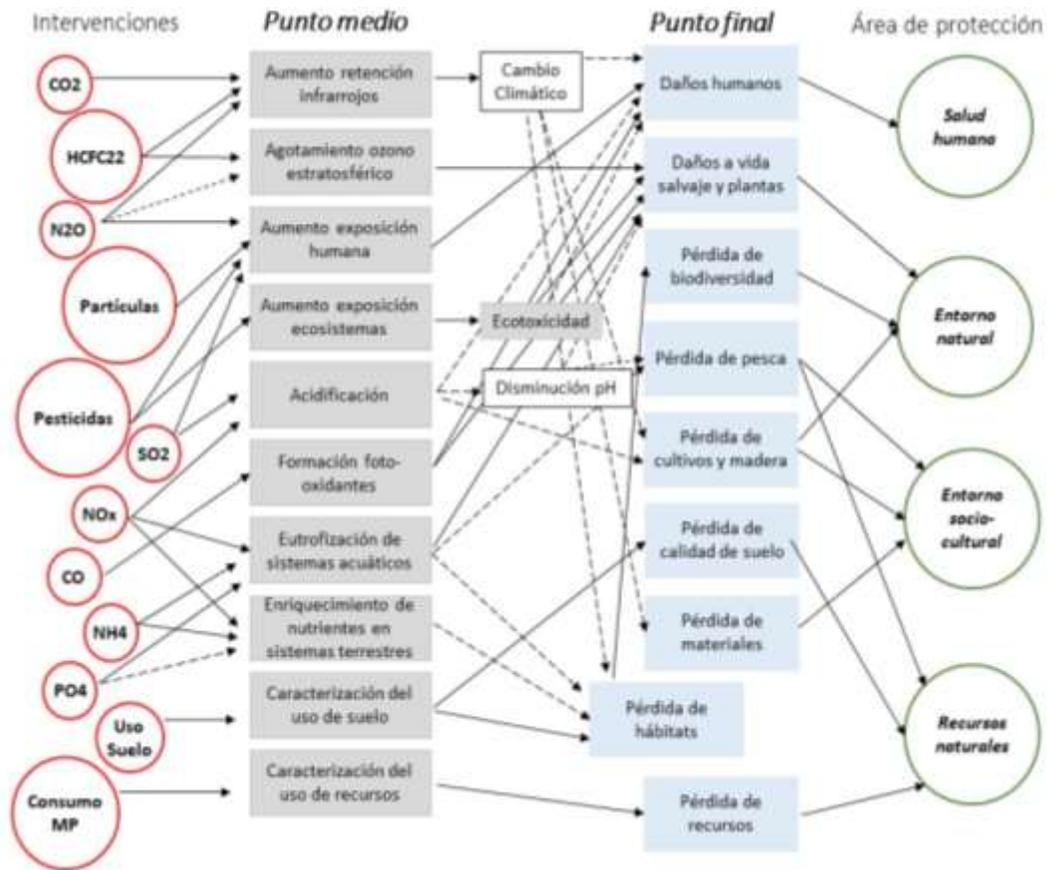


Figura 3. Impactos y áreas de protección
(Fuente: Rosenbaum, 2017)

- *Caracterización*, utilizando modelos ambientales para cuantificar la habilidad de cada flujo para impactar en las categorías de impacto definidas. Para ello, diferentes métodos para la evaluación de impactos dentro del ACV han sido publicados (ver Figura 4).

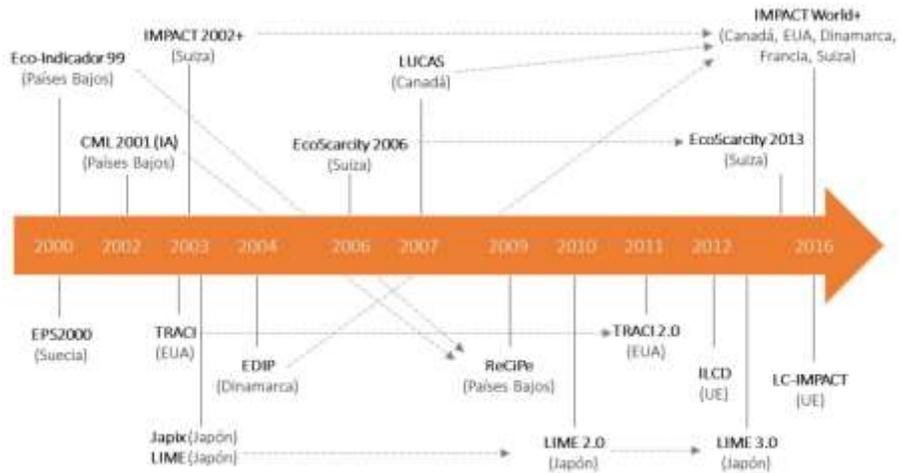


Figura 4. Métodos de evaluación de impacto publicados desde el 2000

(Fuente: Rosenbaum, 2017)

- *Normalización*, la cual es usada para informar sobre la magnitud relativa de cada uno de los puntajes caracterizados para las diferentes categorías de impacto al expresarlos en relación con un conjunto común de impactos de referencia.
- *Agrupamiento*, en donde se comparan las categorías de impacto agrupando y clasificándolas de acuerdo con la gravedad percibida o; *ponderación*, donde se ponderan utilizando factores para cada categoría de impacto expresando su gravedad en relación con otras categorías.

4. Interpretación. De acuerdo con la ISO, ésta es la fase del ACV en donde los resultados, tanto del análisis de inventario como de la evaluación de impacto, son analizados en relación con el objetivo y el alcance definidos previamente con el propósito de formular conclusiones y

recomendaciones (Heijungs & Guinée, 2012). La ISO recomienda que en esta fase se mencionen los siguientes elementos:

- Las cuestiones que se hayan identificado como significativas
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones
- La pertinencia que tuvo la definición del sistema, la unidad funcional y los límites del sistema
- Las limitaciones identificadas en función de la calidad de los datos y la sensibilidad del análisis

2.2.3 Sistema de variables

Para definir el sistema de variables o, en términos de ACV, las categorías de impacto a analizar, los siguientes factores fueron tomados en consideración:

- 1) El objetivo y el alcance de este proyecto
- 2) Las características del sistema a analizar
- 3) Las categorías de impacto que fueron elegidas en ACVs documentados para biocombustibles, en su mayoría provenientes de la biomasa forestal (ver Tabla 1)

TABLA 1. CATEGORÍAS DE IMPACTO ANALIZADAS EN ACVs DE BIOCOMBUSTIBLES

Trabajo:		<i>Bailis et al., 2013</i>	<i>Afrane & Ntiamoah (2011)</i>	<i>Rousset et al., 2011</i>	<i>Laschi et al., 2016</i>	<i>Esteban et al., 2014</i>
Biocombustible:		Carbón vegetal	Carbón vegetal y biogás	Briquetas de leña	Pellets	Astilla
Categoría de impacto	Acidificación	x	x		x	
	Agotamiento recursos fósiles				x	
	Cambio climático	x	x	x	x	X
	Demanda de agua	x				
	Ecotoxicidad de agua dulce		x		x	X
	Ecotoxicidad de agua marina				x	X
	Ecotoxicidad terrestre		x			X
	Eutrofización	x	x			
	Oxidación fotoquímica	x	x		x	
	Agotamiento de ozono	x			x	
	Toxicidad humana		x			X
	Uso de energía	x				

(Fuente: Elaboración propia)

- En Brasil, Bailis y colaboradores (2013) desarrollaron un ACV comparativo del ciclo de vida del carbón vegetal de diferentes tecnologías bajo las siguientes categorías de impacto: cambio climático, demanda de agua, uso de energía, potencial de agotamiento de ozono, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización.
- En Ghana, Afrane & Ntiamoah (2011) compararon diferentes combustibles para cocción, entre los cuales se encontraba el carbón vegetal y el biogás. Las categorías de impacto que los autores analizaron fueron acidificación, eutrofización, ecotoxicidad de agua dulce, cambio climático, toxicidad humana, creación de ozono fotoquímico y ecotoxicidad terrestre.

- En otro estudio se analizó el ciclo de vida de briquetas de carbón de leña únicamente bajo la categoría de cambio climático (Rousset et al., 2011).
- En el 2016, Laschi y colaboradores desarrollaron ACV para pellets de madera seleccionando las categorías de impacto de cambio climático, agotamiento de ozono, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, eutrofización de agua marina, formación de oxidantes fotoquímicos y agotamiento de recursos fósiles.
- Por su parte, Esteban y colaboradores (2014) realizaron un ACV para astilla combustible bajo los impactos de ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad de agua marina, ecotoxicidad terrestre, cambio climático y toxicidad humana.

En virtud de lo anterior, el sistema de variables a estudiar, junto con sus respectivos parámetros y unidades, son presentados en la Tabla 2. Dichos impactos serán ligados posteriormente a una única unidad funcional.

TABLA 2. SISTEMA DE VARIABLES

Área de protección	Variable	Parámetro	Unidad
<i>Ambiente natural</i>	Cambio climático	Emisiones de GEI	gCO _{2e}
	Potencial de agotamiento de la capa de ozono	Emisiones de clorofluorocarbonos	gCFC-11 _e
	Oxidación fotoquímica	Formación de etilenos	gC ₂ H _{4e}
<i>Recursos</i>	Uso de energía	Tasa de retorno energético (TRE)	Adimensional

(Fuente: Elaboración propia)

Los impactos ambientales que se consideran relevantes discutir en el contexto de dicho sistema de variables se presentan en las secciones siguientes.

2.2.3.1 Cambio Climático.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) define este impacto como una variabilidad en el estado del clima que puede ser identificada por cambio en el promedio de éste o en sus propiedades, y que persiste por un periodo extenso de tiempo, típicamente décadas o más (IPCC, 2014).

La energía que llega a la atmósfera terrestre proveniente del Sol está en equilibrio con la energía que sale del planeta, creando así un régimen de temperatura estable en la atmósfera terrestre. Una fracción de dicha energía es reflejada directamente al espacio a través de las moléculas de aire, las nubes y la superficie de la Tierra, efecto conocido como albedo. La energía restante es absorbida por la superficie terrestre y, en la atmósfera, por el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), los cuales se conocen como GEI (Rosenbaum et al., 2018). Al calentarse, la superficie terrestre libera la energía en forma de radiación infrarroja con una longitud de onda más larga que la radiación que fue absorbida inicialmente. Dicha radiación infrarroja se absorbe parcialmente por los GEI y, por lo tanto, se mantiene en la atmósfera en lugar de liberarse al espacio, explicándose así el aumento de la temperatura de la atmósfera. (Ibíd.). El potencial de calentamiento de los GEI se reporta en base al CO₂, teniendo este un valor de 1, el de CH₄ uno de 21 y el N₂O de 310 (IPCC, 2007).

Entre los principales efectos reportados por el IPCC del cambio climático destacan los siguientes (IPCC, 2014a):

- Aumento en la temperatura atmosférica

- Aumento de la temperatura en el océano en los 75 metros superiores con una media mundial de 0.11°C por década de 1971 a 2010
- Derretimiento de glaciares y capas de hielo polar y hielo marino, así como de suelos de permafrost
- Aumento de la media global del nivel del mar de 0.19 m durante el periodo de 1901 a 2010
- Afectaciones a la biodiversidad
- Sequías
- Incendios forestales
- Olas de calor en Europa, Asia y Australia
- Alteración en los sistemas hidrológicos
- Impactos negativos en los rendimientos agrícolas
- Cambios en los vectores de enfermedades infecciosas

En esta categoría de impacto vale la pena diferenciar dos tipos de emisiones de CO₂, las biogénicas, es decir las emisiones emitidas por la vegetación o por microorganismos; y las emisiones netas, las cuales contemplan las emitidas durante el ciclo de vida de algún producto.

2.2.3.2 Agotamiento de ozono

El Ozono (O₃) es una molécula altamente reactiva e inestable, presente en altas concentraciones en las zonas más bajas de la atmósfera (ozono troposférico), así como en altas altitudes (ozono estratosférico). El ozono troposférico es considerado un contaminante debido a los efectos negativos que puede tener en humanos, animales, plantas y materiales. Sin embargo, como un componente de la atmósfera estratosférica, es vital para la vida del planeta Tierra debido a su capacidad de absorber energía rica en radiación UV y, por ende, prevenir que cantidades

destructivas de dicha radiación lleguen a la superficie del planeta (Rosenbaum et al., 2018).

Los clorofluorocarbonos y el óxido nitroso son muy estables en la tropósfera donde se emiten y se transportan a la estratósfera, en donde liberan sustancias químicas activas que destruyen el ozono estratosférico a través de procesos catalizados por cloro u óxido de nitrógeno (Ravishankara et al., 2009).

Los impactos por el agotamiento de la capa de ozono se ligan a la reducción de la capacidad de la estratósfera para absorber la radiación solar, lo que genera un incremento de la intensidad de la radiación UV que entra a la superficie del planeta. Según sea la duración y la intensidad de la exposición, los impactos a la salud humana podrían incluir quemaduras y cáncer de piel, cataratas, aceleración del envejecimiento de las células de la piel, ardor en los ojos e irritación de las vías respiratorias. En lo que respecta a los ecosistemas, los impactos se ligan a daño epidérmico en los animales, daño por radiación a los órganos fotosintéticos de las plantas, así como contaminación fotoquímica, lo que estimularía la producción de ozono troposférico. (Rosenbaum et al., 2018)

Las contribuciones relativas de las sustancias para agotar la capa de ozono se cuantifican por el Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO), el cual relaciona la cantidad de ozono estratosférico destruido por la liberación de una unidad de masa de un químico en la superficie terrestre con la cantidad destruida por la liberación de una unidad de masa de clorofluorocarbonos 11 (CFC-11) (Ravishankara et al., 2009).

2.2.3.3 Formación de oxidantes fotoquímicos

Los impactos negativos de la formación de Oxidantes Fotoquímicos (OF) se deben a su naturaleza reactiva que permite que oxiden moléculas orgánicas en superficies expuestas. Impactos en los seres humanos surgen cuando el ozono y otros

compuestos de oxígenos son inhalados y entran en contacto con el tracto respiratorio, en donde dañan tejido y causan enfermedades respiratorias. Por su parte, impactos en la vegetación surgen cuando los compuestos reactivos atacan las superficies de las plantas o entran en las hojas de las mismas, causando daño oxidativo en sus órganos fotosintéticos. (Rosenbaum et al., 2018).

2.2.3.4 Uso de energía

En la evaluación de fuentes alternas de energía, una premisa fundamental es evaluar que la energía consumida por un sistema sea menor a la energía que dicho sistema proporciona. En ese sentido, dos indicadores han sido usados como criterio para analizar el ciclo de vida de las cadenas productivas: el Tiempo de Recuperación de la Energía (EPBT por sus siglas en inglés) y la Tasa de Retorno Energético (TRE) (Laurent et al., 2018). La TRE es definida como la cantidad de energía utilizable suministrada por un sistema durante su vida útil sobre la energía requerida durante su ciclo de vida (Ibíd.).

Capítulo 3. Marco metodológico

El nivel de investigación del presente trabajo, referido éste como el grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno (Arias, 1999), será de tipo descriptivo. Éste consiste en la caracterización de un hecho o fenómeno para establecer su estructura o comportamiento (*Ibíd.*), en este caso los impactos generados por el aprovechamiento forestal para la producción de BCSF. Adicionalmente, la investigación a realizar será documental y de campo, con enfoque cuantitativo.

3.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Como se mencionó previamente, un ACV consta de las siguientes etapas: (1) *definición del alcance y objetivos*, (2) *análisis de inventario*, (3) *evaluación de impactos* y, (4) *interpretación* (ISO, 2006). En ese sentido, para analizar los impactos establecidos previamente resultantes de las cadenas productivas de los BCSF se desarrollará un ACV para cada una de ellas.

Para la etapa de evaluación de impactos se utilizó SimaPro 8.3, el cual es un software desarrollado por la consultora *Pré Sustainability* para desarrollar diversas herramientas y metodologías, tales como Huella Hídrica, Huella de Carbono, evaluación de la sustentabilidad, Análisis de Ciclo de Vida, entre otras.

La información de las etapas de *Aprovechamiento forestal*, *Producción*, y *Transporte* de los tres biocombustibles, así como parte de los datos de la etapa de *Uso Final* de la cadena de carbón vegetal, fueron recolectados directamente en campo

mediante la aplicación de encuestas. La información secundaria fue obtenida de las siguientes bases de datos:

- a) **Ecoinvent 3.1**, la cual es una de las bases de datos más utilizadas para el inventario de ciclo de vida, así como para otras aplicaciones, tales como las declaraciones ambientales de productos y el eco-etiquetado. Dicha base contiene datos de inventario de ciclo de vida de energía, materiales, plásticos, gestión de residuos, transportes, productos y procesos agrícolas, entre otros.

- b) **Biograce-II**, el cual es un proyecto financiado por el programa *Intelligent Energy Europe* y que tiene como objetivo armonizar los cálculos de las emisiones de GEI para la electricidad, el calor y el enfriamiento de la biomasa en toda la Unión Europea. Esta proporciona la herramienta de cálculo de GEI y brinda información sobre valores estándares relacionados.

3.1.1 Definición de objetivo y alcance

El objetivo del ACV a realizar es analizar cuáles son los impactos ambientales potenciales (en términos de emisiones de GEI, CFCs, OF y de la TRE) del aprovechamiento de los residuos forestales de la EF para producir astilla combustible, aserrín y carbón vegetal.

3.1.1.2 Unidad Funcional

De acuerdo con la ISO 14040, una unidad funcional debe ser definida para el desarrollo del ACV, con el propósito de proveer de una referencia con la que las entradas y salidas puedan relacionarse. En atención al objetivo planteado, y a la función del sistema a analizar, la unidad funcional será definida como **1 MJ** de energía generada y usada como BCSF.

3.1.1.3 Límites del sistema

El ACV a desarrollar tendrá un enfoque de la cuna del BCSF a la combustión del mismo para la generación de calor. Este será de tipo atribucional y se llevará a cabo con información de la EF del año 2017.

En cada una de las cadenas productivas de los tres biocombustibles a analizar se distinguieron las siguientes etapas (ver Figura 5):

- 1) *Aprovechamiento forestal.*** Esta etapa se da en la zona de aprovechamiento y conlleva las actividades relacionadas con el manejo del bosque de pino-encino: marqueo de árboles, el apeo y el trozado de los mismos. Los productos del *aprovechamiento forestal* son madera en rollo de pino y encino.

Cabe mencionar que, dado que la madera proviene de bosques manejados, las emisiones de CO₂ por la combustión son biogénicas y no representan emisiones netas. No ocurre así con las emisiones de otros gases de GEI presentes en la combustión como CH₄ y N₂O.

En esta fase se consideraron también las emisiones debidas al combustible empleado por la maquinaria y equipos para llevar a cabo el aprovechamiento forestal, entre los que destacan motosierras, grúas, máquina de camino, entre

otros (información más detallada del equipo y maquinaria requerida en la sección de *inventario de ciclo de vida*).

2) Producción de BCSF. Posterior al *aprovechamiento forestal*, la madera en rollo de pino es transportada al aserradero de la EF. En el proceso de aserrío se generan los siguientes productos: costeras con corteza (las cuales serán posteriormente astilladas y harneadas en una astilladora eléctrica), escuadría y aserrín.

Por su parte, la madera de encino es llevada a Mixtlán y Cuautla, municipios del estado de Jalisco en donde se localizan en total doce hornos para la producción de carbón vegetal.

3) Venta y transporte. Los BCS producidos en la fase anterior son vendidos a diferentes usuarios. La astilla y el aserrín son cargados libre a bordo¹. El carbón vegetal es vendido a pie de horno en ambos municipios en los que se produce y, posteriormente, el cliente es el encargado de transportar los BCSF para llevarlos a la zona donde se utilizará como combustible.

4) Uso final. Dicha etapa hace referencia a los usuarios de los diferentes transportadores energéticos y a las tecnologías de combustión correspondiente a cada BCSF. La astilla es vendida a una empresa tequilera a 97.5 km de distancia de la EF, el aserrín a ladrilleros que se encuentran a 20 km a la redonda del lugar de producción y el carbón vegetal a un intermediario

¹ Los BCSF son entregados por la EF en el transporte del cliente, quien los recibe en el domicilio de la misma.

de un ingenio azucarero, en donde se desconoce la tecnología de combustión a usar. El usuario final del último BCSF mencionado se encuentra a 160 km y a 145 km de distancia, dependiendo del municipio en donde se produzca el carbón vegetal.

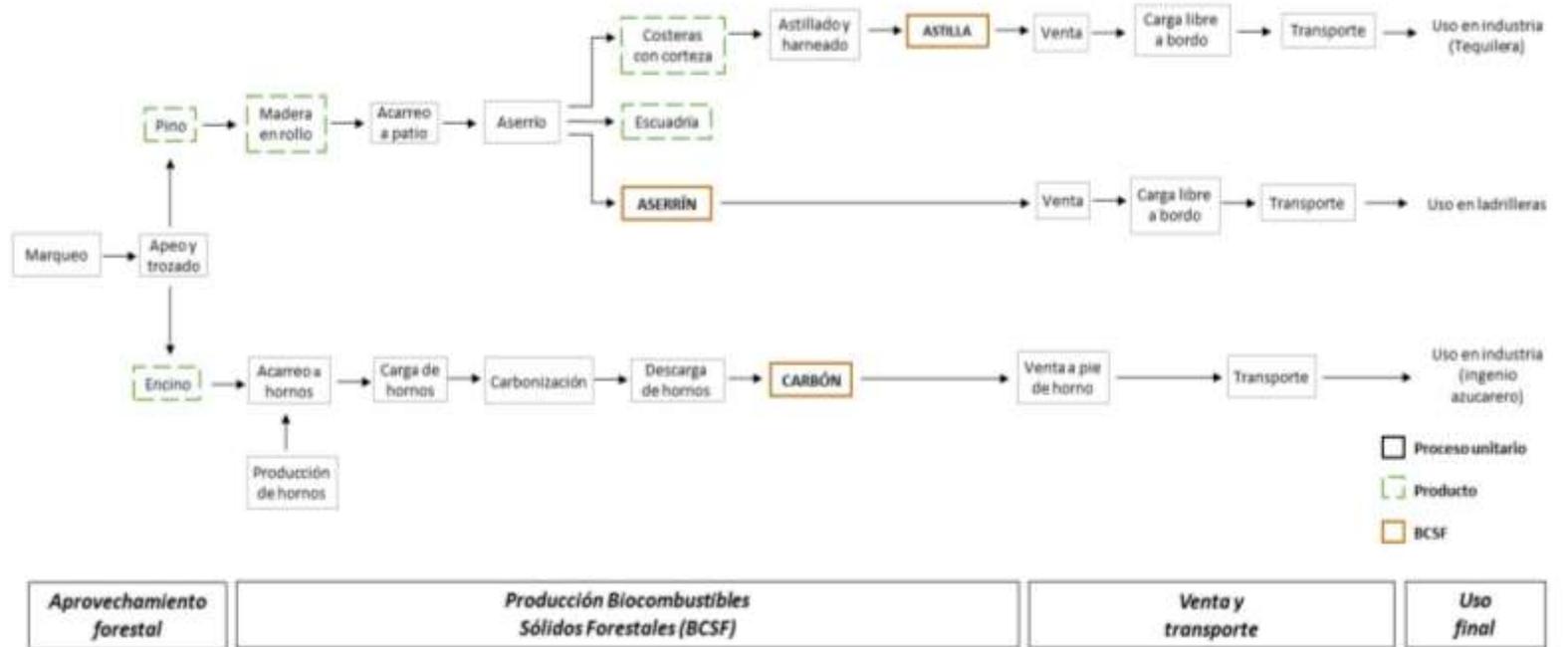


Figura 5. Límites del sistema

(Fuente: Elaboración propia)

3.1.2 Supuestos y consideraciones

Para el desarrollo de la fase *evaluación de impacto*, los siguientes supuestos fueron tomados en consideración:

- Se asume una densidad promedio para la madera de pino de 0.51 t/m³ y para la de encino de 0.63 t/m³ (Ordóñez et al., 2005).
- Se considera un contenido de humedad de la madera de pino del 50% y un poder calorífico inferior para la astilla y el aserrín de 8 MJ/kg (Van Loo & Koppejan, 2008) y para el carbón vegetal de 30.8 MJ/kg (FAO, 2017).
- En lo que respecta a los combustibles fósiles, se estima un poder calorífico para la gasolina de 34 MJ/litro, para el diésel de 37.5 MJ/litro, y para el aceite de 39.6 MJ/litro (Biograce II, 2015).
- Se considera que el aprovechamiento forestal es llevado a cabo de manera sustentable, por lo que las emisiones de CO₂ de los biocombustibles son biogénicas.
- Se asume que las motosierras utilizadas en la fase de aprovechamiento forestal tienen una eficiencia del 24%.
- En lo referente al aserradero, se considera que éste opera 36 semanas anualmente.
- Para los hornos de carbón vegetal se asume un rendimiento del 31% (Arias, 2008), un tiempo de quema de 7.5 días y un tiempo de enfriado de 4 días.
- En la etapa de transporte de los tres biocombustibles, se considera que el medio es un camión a diésel con capacidad de 12 ton, con una eficiencia de combustible de 3 km/L. Y se asume que éste va siempre al 100% de su capacidad.

- Para la etapa de *Uso Final* del carbón vegetal, se asume un uso tradicional con un factor de emisión de 29.7 gCO₂e por MJ, contemplando las emisiones de CO₂, NO_x, CO, CH₄ y N₂O (FAO, 2017).

3.1.3 Criterios de asignación

La asignación es utilizada en los ACVs para resolver las situaciones en las que un mismo proceso unitario genera más de un solo producto. Para ello, las normas ISO sugieren evitar en donde sea posible el uso de asignaciones, no obstante, es difícil llevarlo a la práctica dada la gran necesidad de datos para hacerlo, los cuales no siempre están disponibles. De manera alternativa, la norma propone un procedimiento para asignar las diferentes cargas ambientales a los diferentes co-productos mediante tres criterios diferentes: por masa, por energía y por valor económico.

En el sistema a analizar en este trabajo se presentan dos momentos en las cadenas productivas de los BCSF en las que un mismo proceso genera varios productos. El primero de ellos es en el *aprovechamiento forestal*, en el que se extrae madera en rollo tanto de pino como de encino. El segundo es en el proceso de aserrío, en donde se genera escuadría, costeras para astilla y aserrín. Dadas las situaciones anteriores y, acorde con la unidad funcional establecida previamente, se eligió utilizar un criterio de asignación por energía.

3.1.4 Impactos a evaluar

Los impactos evaluados en el presente ACV son de punto medio. Las categorías de impacto, junto con su respectivo indicador, son mencionadas en la Tabla 3 y explicadas metodológicamente a continuación.

TABLA 3. CATEGORÍAS DE IMPACTO E INDICADORES A EVALUAR

Categoría de impacto	Indicador
Cambio climático	Emisiones de GEI
Agotamiento de la capa de ozono	Emisiones de clorofluorocarbonos
Formación de oxidantes fotoquímicos	Formación de etilenos
Uso de energía	Tasa de Retorno Energético

(Fuente: Elaboración propia)

- **Cambio Climático**

El indicador de punto medio en los ACVs para la categoría de Cambio Climático es el Potencial de Calentamiento Global (GWP por sus siglas en inglés), el cual es una métrica de emisión introducida por el IPCC. El potencial de calentamiento global es calculado para cada gas de efecto invernadero de la siguiente manera:

(Ec. 1)

$$GWP = \frac{\int_0^T a_i \cdot C_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(t) dt}$$

En dónde:

a_i : Absorción térmica radiativa (fuerza radiativa instantánea) seguida de un incremento de una unidad en la concentración del gas i

$C_i(t)$: Concentración del gas i que permanece en el tiempo t después de la emisión

T : Número de años en que la integración se lleva a cabo

- **Agotamiento de la capa de ozono**

El indicador de punto medio usado en la evaluación de impacto del ACV para calcular los factores de caracterización es la de Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO). Este evalúa el potencial de un químico para destruir la capa de ozono basándose en un modelo de la Organización Mundial Meteorológica (WMO 2014), el cual expresa la reducción global en las concentraciones de ozono estratosférico por una sustancia *i* relativa a la reducción global de O₃ estratosférico concentración C_{O₃} por 1 kg de CFC-11. El PAO se expresa en CFC-11 equivalente:

(Ec. 2)

$$PAO = \frac{\Delta C_{O_3} (i)}{\Delta C_{O_3} (CFC - 11)}$$

- **Formación de oxidantes fotoquímicos**

El método CML-IA utiliza el modelo denominado Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP por sus siglas en inglés), el cual modela situaciones típicas en términos de meteorología, química atmosférica y emisiones concomitantes de otros contaminantes atmosféricos. Para cada Compuesto orgánico volátil, se presenta un factor de caracterización. (Rosenbaum et al., 2018)

- **Uso de energía**

En el presente análisis se utilizará la Tasa de Retorno Energético para evaluar el uso de energía. Para el presente trabajo, dicho indicador es un cociente de la energía consumida durante el ciclo de vida del biocombustible en cuestión y la energía proporcionada por éste. Es decir, la TRE se expresará de la siguiente forma:

(Ec. 3)

$$TRE = \frac{\text{Energía total proporcionada por el BCSF}}{\text{Energía total consumida durante el ciclo de vida del BSF}}$$

3.1.5 Métodos de evaluación de impacto

Los criterios principales para seleccionar el método de evaluación de impacto para el presente ACV fueron los siguientes:

- 1) Inclusión de las categorías de impacto e indicadores a analizar en el método de evaluación de impacto a elegir
- 2) Región geográfica en la que el método tiene lugar
- 3) Grado de documentación del método

En la Tabla 4 se presentan los principales métodos de evaluación de impacto de punto medio, las categorías de impacto que incluyen, así como la región que abarcan.

TABLA 4. CATEGORÍAS DE IMPACTO DE DIFERENTES MÉTODOS DE PUNTO MEDIO

Categoría de impacto:	Método							
	CML-IA	TRACI 1.0	IMPACT 2002+	EDIP 2003	ReCiPe 2008	TRACI 2	ILC/PEF/OEF	IMPACT World +
<i>Cambio climático</i>	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global
<i>Agotamiento de la capa de ozono</i>	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global
<i>Formación de material particulado</i>	-	EUA	Europa	-	Europa	EUA	Genérico	Genérico
<i>Formación de oxidantes fotoquímicos</i>	Europa	EUA	Europa	Europa	Europa	EUA	-	Europa
<i>Radiación ionizante</i>	Global, Europa	-	Global, Europa	-	Global, Europa	-	-	-
<i>Toxicidad humana</i>	Europa	EUA	Europa	Europa	Europa	Genérico	Genérico	Genérico
<i>Ecotoxicidad</i>	Europa	EUA	Europa	Genérico	Europa	Genérico	Genérico	Genérico
<i>Eutrofización</i>	Genérico	EUA	Genérico	Europa	Europa	EUA	Europa	Global
<i>Acidificación</i>	Europa	Norte América	Europa	Europa	Europa +	Norte América	Europa	Global
<i>Uso de suelo</i>	-	-	-	-	Global	-	Global	Global
<i>Recursos</i>	Global	-	-	Global	Global	-	Global	Global
<i>Uso de agua</i>	-	-	-	-	-	-	Global	Global

(Fuente: Elaboración propia con datos de Hauschild et al., 2018)

Ante dichos criterios, tres métodos fueron seleccionados para profundizar en el análisis según las categorías de impacto a evaluar: CML-IA, ReCiPe e IMPACT World+ (ver Tabla 5).

TABLA 5. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE PUNTO MEDIO

CI	Método:	CML-IA	ReCiPe 2008	IMPACT World +
	Referencia:	Guinée et al. (2002)	Goedkoop et al., (2012)	Bulle et al. (en revisión)
Cambio Climático	Modelo de caracterización:	GWP del IPCC (2007a)	GWP del IPCC (2007a)	GWP y GTP del IPCC (2013)
	Indicador:	Forzamiento radiativo	Forzamiento radiativo	Forzamiento radiativo
	Horizonte de tiempo:	100 años	100 años	GWP100 para impactos de corto plazo y GTP100 para impactos de largo plazo
	Región modelada:	Global	Global	Global
	Unidad:	CO ₂ equivalente	CO ₂ equivalente	CO ₂ equivalente
Agotamiento de la capa de ozono	Modelo de caracterización:	ODP de la OMM (2003)	ODP de la OMM (2003)	ODP de la OMM
	Indicador:	Degradación global en la concentración de O ₃ estratosférica	Degradación global en la concentración de O ₃ estratosférica	Degradación global en la concentración de O ₃ estratosférica
	Horizonte de tiempo:	Infinito	Infinito	Infinito
	Región modelada:	Global	Global	Global
	Unidad:	CFC-11 equivalente	CFC-11 equivalente	CFC-11 equivalente
Formación de oxidantes fotoquímicos	Modelo a futuro:	POCP	Modelo LOTOS-EUROS 2007	Modelo LOTOS-EUROS 2007
	Compartimientos de emisión:	Aire	Aire	Aire
	Región modelada:	Europa	Europa	Europa
	Unidad:	C ₂ H ₄ equivalente	kg nmVOC equivalente	kg nmVOC equivalente

(Fuente: Elaboración propia con datos de Hauschild et al., 2018)

Finalmente, para la fase de *evaluación de impactos* del ACV se seleccionó el método CML-IA, el cual fue desarrollado por el Center of Environmental Sciences (CML) de la Universidad de Leiden en los Países Bajos. Dicho método elabora un enfoque orientado a indicadores de punto medio y fue elegido ya que su metodología contempla las categorías de interés para el presente análisis y aplica a nivel global en la mayoría de los impactos.

3.2 Análisis de sensibilidad

Una de las propiedades más importantes de la materia prima para la producción de bioenergía es su contenido de humedad, ya que éste determinará el poder calorífico del biocombustible y, por ende, la cantidad de energía entregada por el sistema al final de su ciclo de vida. Ambas cualidades tendrán un impacto en el costo de la materia prima por unidad de energía producida, transporte, pre-tratamiento y costos de almacenamiento, así como en su idoneidad para alguna tecnología de conversión (IRENA, 2012).

Así pues, dichas propiedades influirán de manera significativa en las emisiones de GEI producidas durante el ciclo de vida del biocombustible, el retorno energético, así como en la energía requerida para el procesamiento de la materia prima. En ese sentido, se desarrolló un análisis de sensibilidad para las categorías de impacto de Cambio Climático y Uso de energía para la astilla y el aserrín, tomando diferentes valores de contenido de humedad con la finalidad de evaluar la sensibilidad de los datos resultantes de la fase de *evaluación de impactos* del ACV.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Análisis de inventario

Los insumos del sistema se componen principalmente por combustibles fósiles y electricidad utilizada para el equipo del aserradero.

Las entradas al sistema se reportan en el Análisis de inventario (Tabla 6) tanto anual como con base en la unidad funcional.

TABLA 6. ANÁLISIS DE INVENTARIO: PROCESOS E INSUMOS

Etapa	Proceso	Finalidad	Productividad anual	Equipo requerido	Insumo	Consumo anual ¹	Consumo por 1 MJ	Unidad
Aprovechamiento forestal	Marqueo	Marcar camino en zona de aprovechamiento	486 hrs	Máquina camino (7 L/hr)	Diésel	2,431.94	0.00008	L
					Lubricante	24.32	8.49E-07	L
	Apeo y trozado	Cortar madera en pie	6,000 m3r	Motosierras	Gasolina	345.88	1.21E-05	L
					Aceite	276.70	9.66E-06	L
		Mover madera en rollo	6,000 m3r	Grúas	Diésel	16,453.82	0.0006	L
					Lubricante	164.54	5.75E-06	L

Producción	Acarreo a patio	Llevar madera en rollo de pino a patio de aserradero	5,000 m ³ r	Torton (3 km/L)	Diésel	855.00	0.0001	L
					Lubricante	8.55	5.24E-07	L
	Acarreo a hornos	Llevar madera en rollo de encino a hornos de CV	1,000 m ³ r	Torton (3 km/L)	Diésel	170.00	0.00001	L
					Lubricante	1.70	1.38E-07	L
	Aserrío	Aserrar madera en rollo de pino	5,000 m ³ r	Aserradero (45 kW)	Electricidad	18,949.53	0.0012	kWh
					Madera en rollo de pino	5,000	0.0003	m ³ r
	Astillado y harneado	Astillar costaneros	3,000 m ³	Astilladora (42 kW)	Electricidad	15,120	0.0012	kWh
					Costaneros	3,000	0.0002	m ³
	Carbonización	Producir carbón vegetal	400 ton	Hornos (Eficiencia del 31%)	Madera de encino	1,000	0.0001	m ³ r
	Transporte	Transporte usuario	Transportar astilla a industria tequilera	3,000 m ³ a a 97.5 km	Camión a diésel (12 ton)	Diésel	4,160.00	0.00034
Lubricante						41.60	3.40E-06	L
Transportar aserrín a ladrilleras			1,000 m ³ a a 20 km	Camión a diésel (12 ton)	Diésel	286.67	0.00007	L
					Lubricante	2.87	7.03E-07	L

		Transportar CV a ingenio azucarero	400 ton a 145 km	Camión a diésel (12 ton)	Diésel	3,045.00	0.00025	L
					Lubricante	30.45	2.47E-06	L
Uso final	Generar calor para industria	Hornos tequileros	12,240,000 MJ	Caldera para astilla	Astilla	3,000	0.0002	m ³ a
		Ladrilleras	4,080,000 MJ	Horno ladrillero, caldera para aserrín	Aserrín	1,000	0.00025	m ³ a
		Ingenio azucarero	12,320,000 MJ	Horno convencional	Carbón vegetal	400	0.00003	Ton

(¹ No se presentan los consumos asignados a la escuadría, únicamente aquéllos relacionados con los BCSF analizados)

(Fuente: Elaboración propia con base en entrevistas al productor y datos secundarios)

En la Figura 6 se aprecia un diagrama con los diferentes flujos de energía en el sistema analizado. El ancho de cada flecha representa el consumo energético; a mayor grosor, mayor será el gasto de energía del proceso en cuestión.

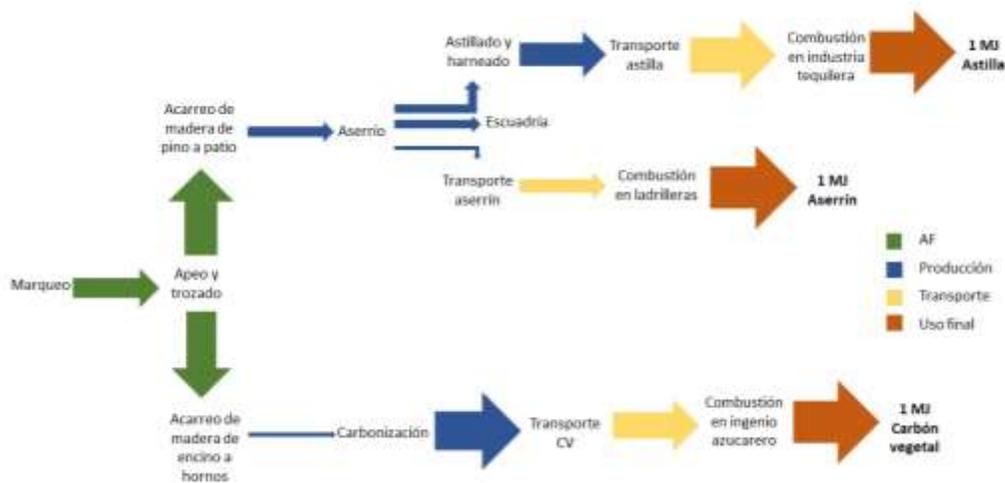


Figura 6. Diagrama de flujos de energía del sistema para producir y usar 1 MJ.
(Fuente: Elaboración propia)

4. 2 Evaluación de impactos

4.2.1 Cambio climático

En la categoría de impacto de Cambio Climático, se estimaron las emisiones de GEI durante el ciclo de vida de los biocombustibles por cada MJ de energía entregado. Dicha categoría se calculó con el método CML-IA, los resultados se reportan en gramos de CO₂e por MJ.

El BCSF que tuvo una mayor contribución en dicha categoría fue el carbón vegetal con 47.2 gCO₂e/MJ, seguido por la astilla con 5.4 gCO₂e/MJ y el aserrín con 3.5 gCO₂e/MJ (ver Figura 7).

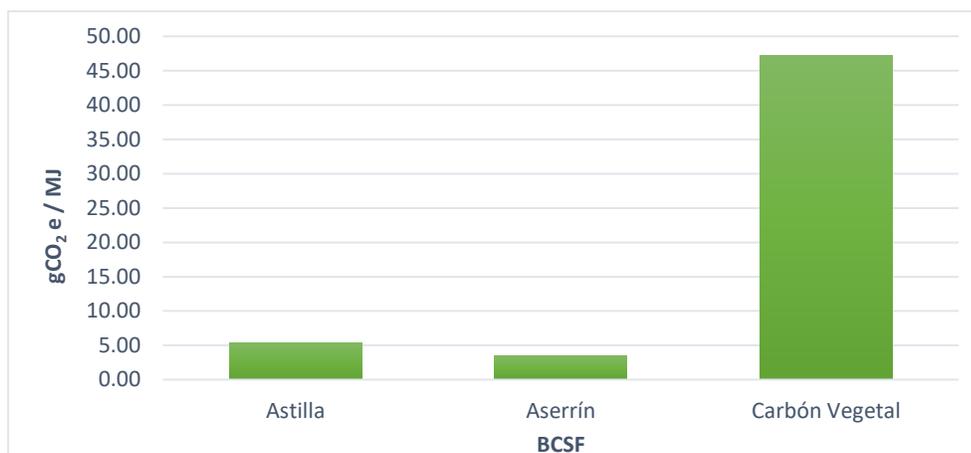


FIGURA 7. CONTRIBUCIÓN A LA CATEGORÍA DE CAMBIO CLIMÁTICO POR BCSF
(Fuente: Elaboración propia)

Carbón vegetal

Para el caso del carbón vegetal, la etapa que aportó en mayor medida a la categoría de Cambio Climático fue la de *Producción*. Lo anterior se deriva de las altas emisiones de CO₂e provocadas durante el proceso de carbonización, el cual es el responsable del 78.4% del impacto potencial estimado para este biocombustible.

Por su parte, la etapa de *Uso final* aportó con aproximadamente el 15% de las emisiones de GEI, seguido por el *Aprovechamiento forestal* con el 6.4% y el *Transporte* con menos del 0.2%. En la Figura 8 pueden observarse las emisiones por etapa del ciclo de vida de este biocombustible.

Cabe destacar que las emisiones reportadas para este BCSF no contemplan el CO₂ biogénico, ya que se asume que el bosque en cuestión fue manejado bajo criterios de sustentabilidad. En cambio, si se contabilizara el CO₂ como una fuente neta de emisiones, las emisiones del ciclo de vida del carbón vegetal alcanzarían los 129.2 gCO₂e / MJ.

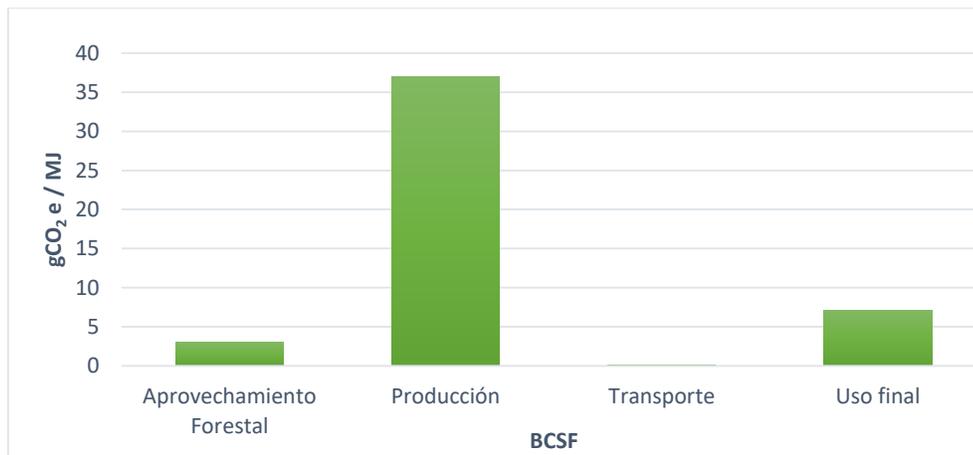


FIGURA 8. CARBÓN VEGETAL: EMISIONES DE GEI POR ETAPA DEL CICLO DE VIDA
(Fuente: Elaboración propia)

Astilla Combustible

Por su parte, se estimó que la astilla emite aproximadamente 5.4 gCO₂e por MJ de energía, siendo la etapa de *Uso final* la que mayor contribución de GEI genera (62%), seguido por la etapa de la *Producción* (29%), el *Aprovechamiento forestal* (6%) y el *Transporte* (3%). Lo anterior puede explicarse por la alta demanda de energía eléctrica que se genera en la etapa de *Producción*. En la Figura 9 pueden observarse las emisiones por etapa del ciclo de vida de dicho biocombustible.

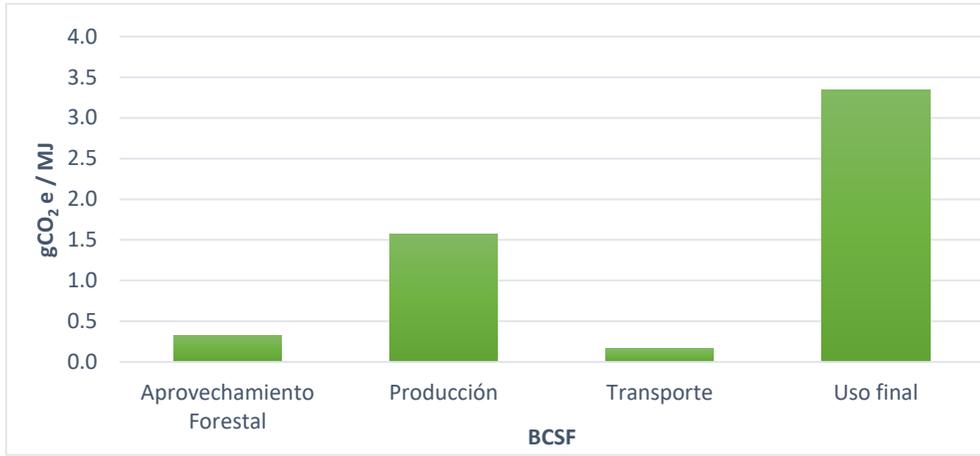


FIGURA 9. **ASTILLA COMBUSTIBLE: EMISIONES DE GEI POR ETAPA DE CICLO DE VIDA**
(Fuente: Elaboración propia)

Aserrín

En lo que respecta al aserrín, se estimó un factor de emisión de 3.5 gCO₂e por MJ, siendo, al igual que la astilla, la etapa de *Uso final* la que mayor contribución genera (67%), seguido por la etapa de *Producción* (22%), *Aprovechamiento forestal* (9%) y, por último, *Transporte* (1%) (Ver Figura 10).



FIGURA 10. **ASERRÍN: EMISIONES DE GEI POR ETAPA DE CICLO DE VIDA**
(Fuente: Elaboración propia)

En la Tabla 7 se reportan los valores de emisiones de GEI estimadas por etapa de ciclo de vida para la astilla, el aserrín y el carbón vegetal y, se observan de manera gráfica en la Figura 11.

TABLA 7. EMISIONES DE GEI POR BCSF

Biocombustible	Etapa				
	AF	Producción	Transporte	Uso final	Total
<i>Astilla</i>	0.3	1.6	0.2	3.3	5.4
<i>Aserrín</i>	0.3	0.8	0.03	2.3	3.5
<i>Carbón vegetal</i> ¹	3	37	0.1	7.1	47.2

(¹ Emisiones reportadas en gCO₂e / MJ; ¹ no incluye emisiones de CO₂ biogénico)

(Fuente: Elaboración propia)

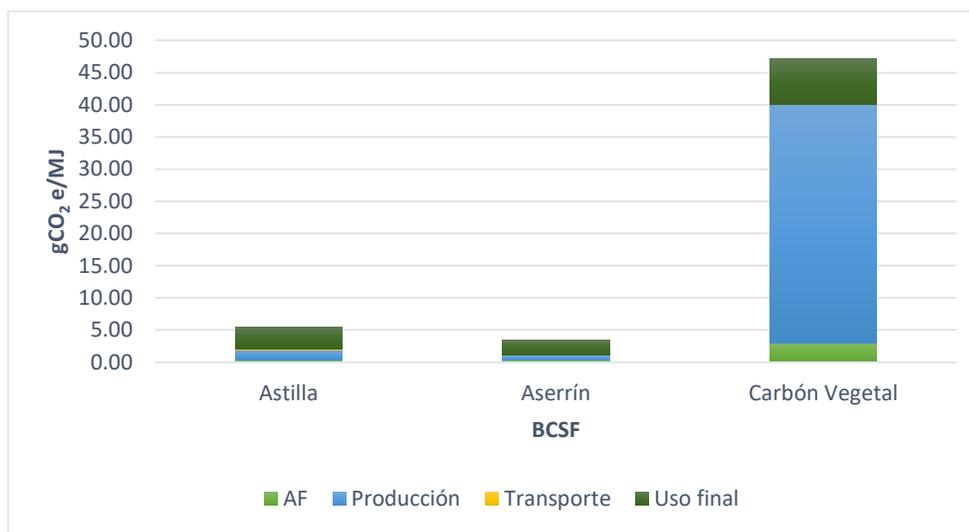


FIGURA 11. EMISIONES DE GEI REPORTADAS POR ETAPA POR BCSF

(Fuente: Elaboración propia)

4.2.2 Agotamiento de ozono

En la categoría de potencial de agotamiento de ozono, se estimaron las emisiones de clorofluorocarbonos (CFC) durante el ciclo de vida de los biocombustibles por cada MJ de energía entregado. Los resultados se reportan en gramos de CFC-11e/MJ (ver Figura 12).

En esta categoría de impacto, el ciclo de vida del aserrín fue el que mayor contribución tuvo, produciendo $1.02E^{-06}$ gCFC-11e/MJ. La etapa que mayor aportación generó para dicho BCSF fue la de *Uso final*, siendo responsable del 48% de las emisiones. Lo anterior se debe a los gases de N_2O y CO que son emitidos durante el proceso de combustión del biocombustible. El *Aprovechamiento forestal* representa el 39% de las emisiones en esta categoría, la *Producción* el 9% y el *Transporte* el 1%.

Por su parte, se estimó que la astilla emite $7.7E^{-07}$ gCFC-11e por MJ de energía entregado. La etapa de *Aprovechamiento forestal* es la responsable del 51% de dichas emisiones, el *Transporte* del 26%, la *Producción* del 20% y el *Uso final* del 3%.

Por último, se determinó que el carbón vegetal contribuye con $5.5E^{-07}$ gCFC-11e/MJ a la categoría de agotamiento de la capa de ozono, siendo la etapa de *Aprovechamiento forestal* la que contribuye con la mayoría de las emisiones (72%).

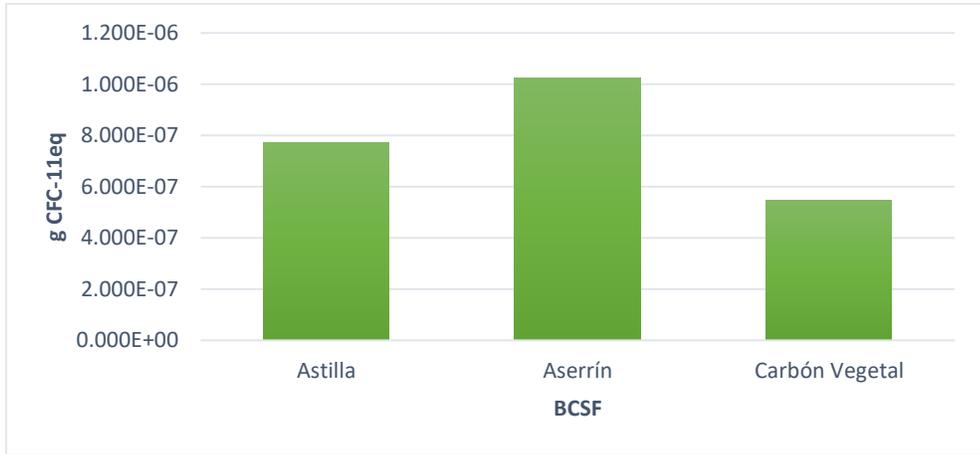


FIGURA 12. POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO POR BCSF
(Fuente: Elaboración propia)

4.2.3 Formación de oxidantes fotoquímicos

En esta categoría se calculó el potencial de cada uno de los biocombustibles para formar oxidantes fotoquímicos. El carbón vegetal es el que mayor potencial de formación de oxidantes fotoquímicos genera al emitir 247.7 mgC₂H₄e/MJ, seguido por la astilla con 2.7 mgC₂H₄e/MJ y el aserrín con 1.7 mgC₂H₄e/MJ. Como puede observarse en la Figura 13, los potenciales de la astilla y el aserrín son muy bajos en comparación con los del carbón vegetal.

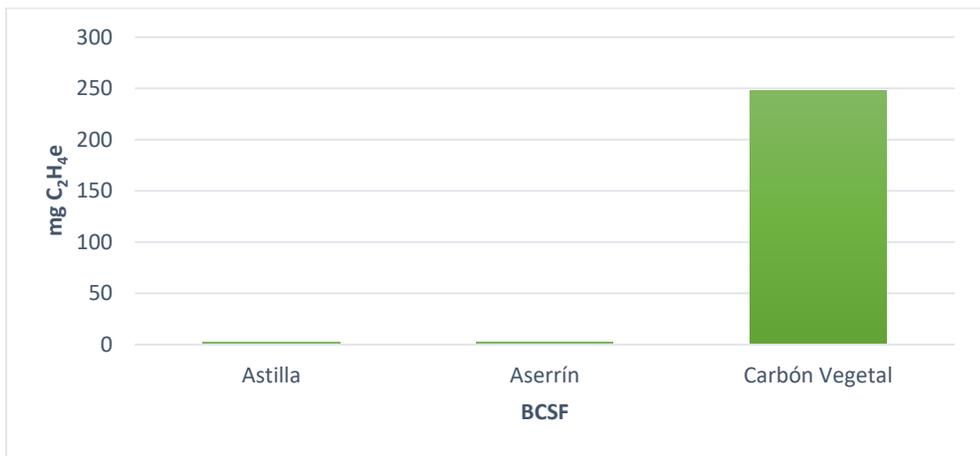


FIGURA 13. FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS POR BCSF
(Fuente: Elaboración propia)

A excepción del carbón vegetal, el *Uso final* es el que contribuye en mayor medida para esta categoría de impacto (75% para la astilla y 76% para el aserrín). En cambio, el proceso de carbonización que tiene lugar durante la *Producción* del carbón vegetal es el responsable del 99% de las emisiones de C_2H_4e de dicha cadena productiva debido, principalmente, a los óxidos nitrosos y al monóxido de carbono producidos.

4.2.4 Tasa de Retorno Energético (TRE)

La Tasa de Retorno Energético es un indicador que muestra la relación que hay entre la energía entregada por el biocombustible y la energía consumida durante el ciclo de vida por el mismo. El biocombustible forestal que presenta la TRE más alta es el aserrín (29:1), seguido por el carbón vegetal con 28:1 y la astilla con 23:1 (ver Figura 14).

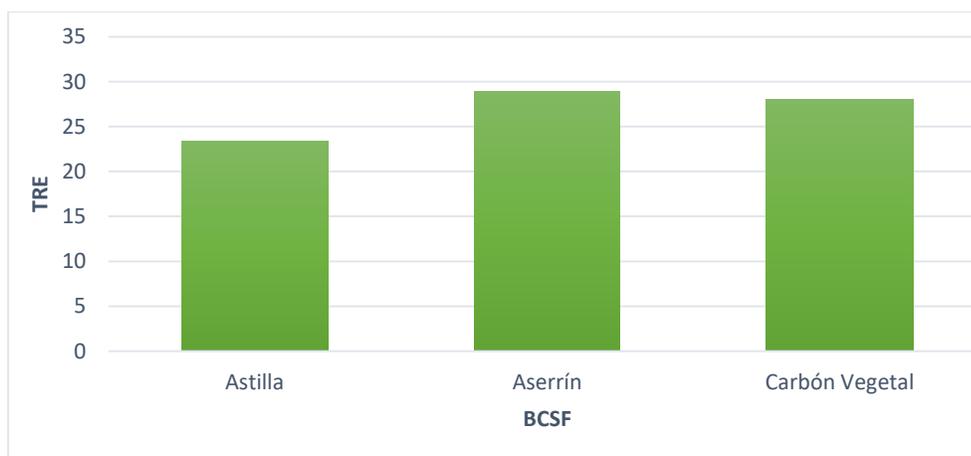


FIGURA 14. TASA DE RETORNO ENERGÉTICO POR BCSF
(Fuente: Elaboración propia)

4.2.5 Resumen de indicadores

Carbón Vegetal

Para el caso del carbón vegetal, la etapa de *Producción* es la que contribuye en su gran mayoría a las categorías de oxidación fotoquímica y cambio climático. Lo anterior puede ser explicado por las emisiones generadas durante el proceso de carbonización. En cambio, para las demás categorías, la etapa de *Aprovechamiento forestal* es la que más impacto produce. En la Figura 15 puede observarse la contribución que tuvo cada etapa para las categorías de impacto evaluadas.

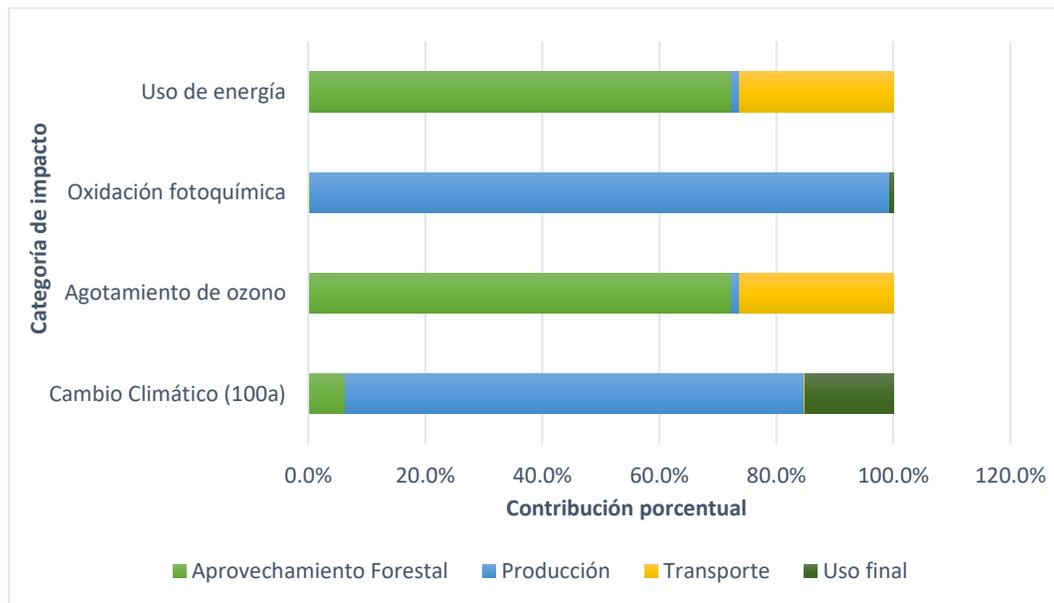


FIGURA 15. CARBÓN VEGETAL: IMPACTOS ESTIMADOS POR ETAPA DE CICLO DE VIDA
(Fuente: Elaboración propia)

Astilla Combustible

En lo referente a la astilla, es notable que la etapa de *Uso final* es la que mayor cantidad de impactos genera para las categorías de impacto de oxidación fotoquímica y cambio climático. Para las categorías de uso de energía y agotamiento de ozono, la etapa de *Aprovechamiento forestal* contribuye significativamente (ver Figura 16).

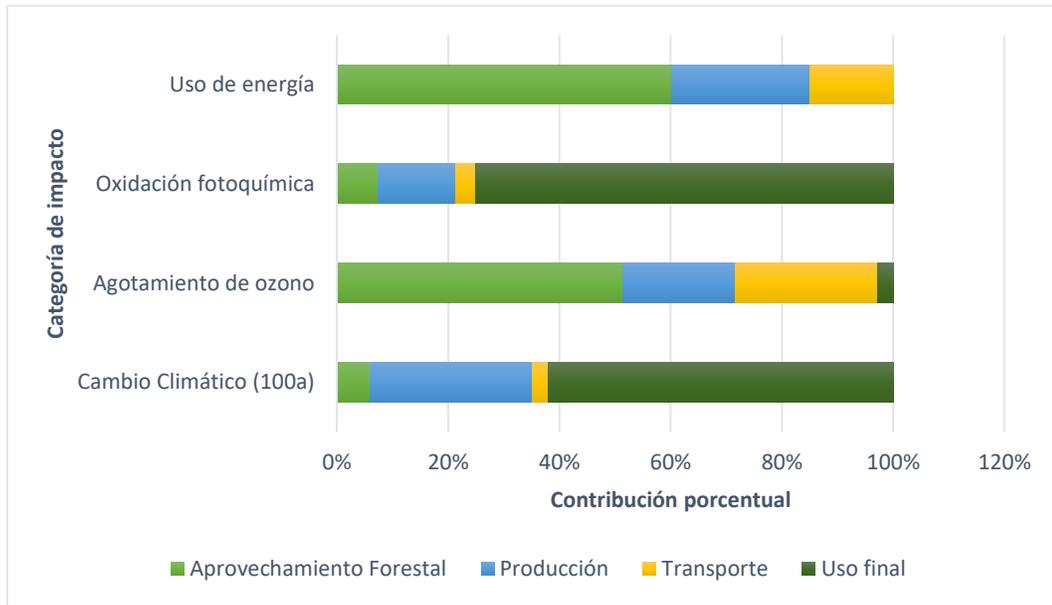


FIGURA 16. **ASTILLA COMBUSTIBLE: IMPACTOS ESTIMADOS POR ETAPA DE CICLO DE VIDA**
(Fuente: Elaboración propia)

Aserrín

Los impactos potenciales del ciclo de vida del aserrín se adjudican en su mayoría a la etapa de *Uso final* para las categorías de impacto de oxidación fotoquímica, agotamiento de ozono y cambio climático. Por su parte, la etapa de *Aprovechamiento forestal* es la de mayor demanda de energía (ver Figura 17).

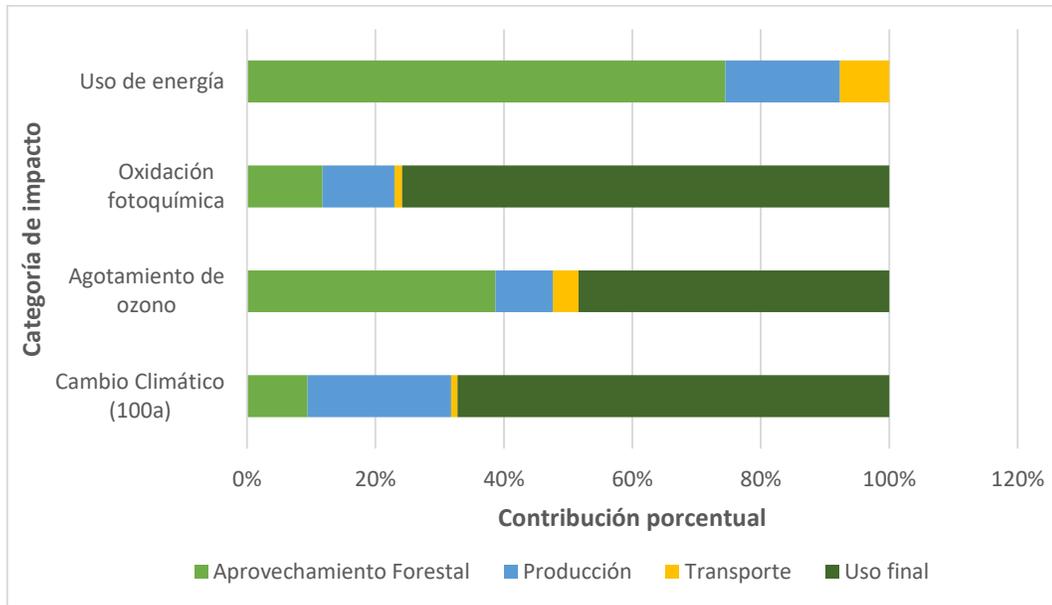


FIGURA 17. ASERRÍN: IMPACTOS ESTIMADOS POR ETAPA DE CICLO DE VIDA
(Fuente: Elaboración propia)

4.3 Análisis de sensibilidad

En lo referente al análisis de sensibilidad, se identificó una relación positiva entre el contenido de humedad de la biomasa de pino y el factor de emisión de CO₂e (ver Figura 18). Para el caso de la astilla, se calcularon emisiones de 4.7 gCO₂e/MJ cuando la biomasa presenta un contenido de humedad del 30%. En cambio, cuando la materia prima tiene un contenido de humedad mayor (50%), se estimó que el biocombustible en cuestión emite 5.4 gCO₂e/MJ. En lo referente al aserrín, se valoró que a un contenido de humedad del 30%, este emite 3.3 gCO₂e/MJ. Al aumentar su contenido de humedad al 50%, sus emisiones aumentan a 3.5 gCO₂e/MJ. Es decir, a mayor contenido de humedad de la materia prima, mayores serán sus emisiones de GEI debido a la menor salida de energía. Como puede observarse, las emisiones por MJ de energía de la astilla son más sensibles a los cambios en la humedad de la materia prima en comparación con el aserrín.

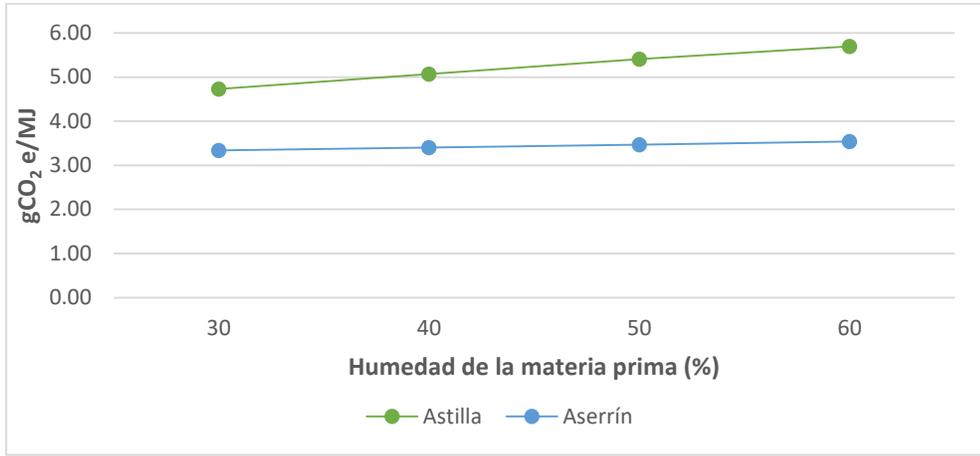


FIGURA 18. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: CAMBIO CLIMÁTICO
Fuente: Elaboración propia

En lo que al uso de energía respecta, se estima para la astilla una TRE de 29:1 cuando la materia prima tiene un contenido de humedad del 30% y de 23:1 cuando esta tiene el 50%. En cambio, el aserrín presenta una TRE de 40:1 con un 30% de humedad y de 29:1 cuando la biomasa presenta un contenido de humedad del 50%. En la Figura 19 se muestra el cambio tan significativo que sufre la tasa de retorno energético con el cambio en la humedad de la biomasa para la producción de ambos BCSF, siendo en este caso la TRE del aserrín más sensible.

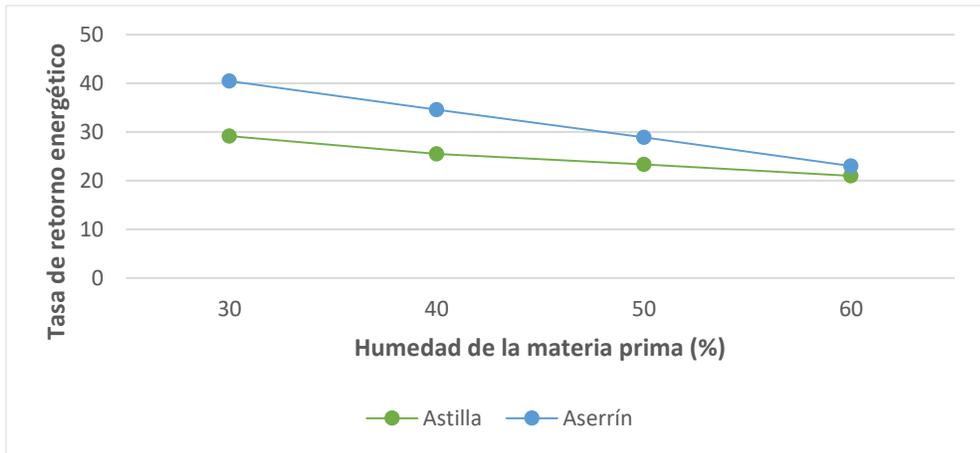


FIGURA 19. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: USO DE ENERGÍA
Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5. Discusión

En las secciones del presente capítulo se discutirán los resultados encontrados por cada categoría de impacto.

5.1 Cambio Climático

En la Figura 20 se observa la comparación de las emisiones de CO₂e en el ciclo de vida de diferentes combustibles fósiles con el de los tres biocombustibles analizados en el presente trabajo. En el tema de emisiones de dióxido de carbono equivalente por unidad de energía, los BCSF presentan una ventaja substancial ante la producción y uso del gas LP, el gas natural, el carbón, el diésel y la gasolina. Por ejemplo, en comparación con el carbón mineral, se estima que el carbón vegetal puede mitigar hasta un 57.9% de las emisiones por MJ de energía. Por su parte, para la astilla y el aserrín resultó una mitigación del 66% y del 68% respectivamente, en comparación con el gas natural.

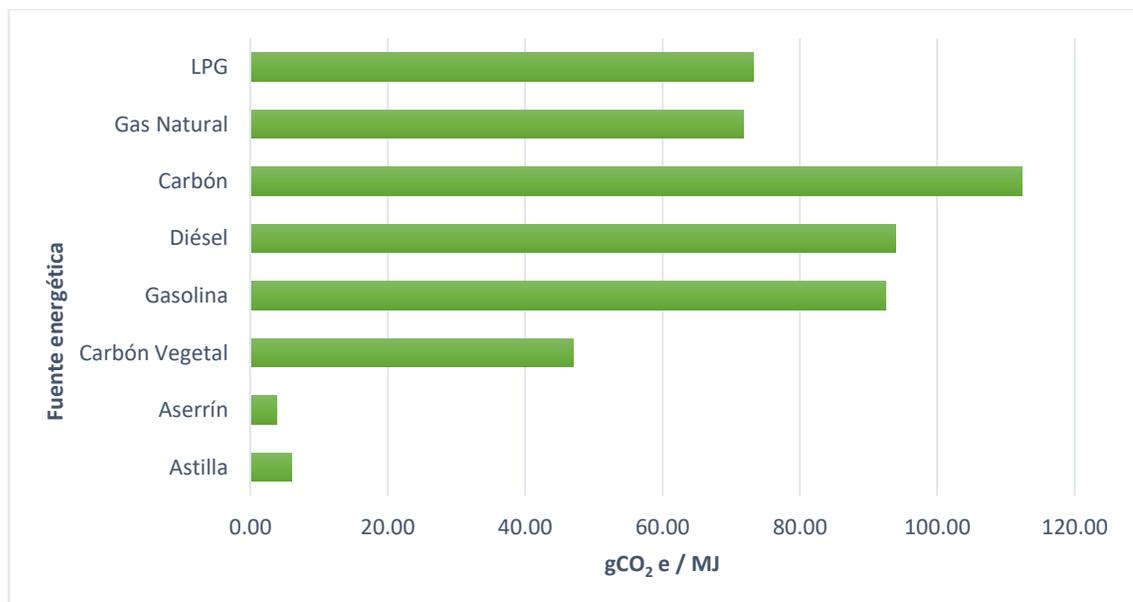


FIGURA 20. COMPARACIÓN DE EMISIONES DE GEI EN EL CICLO DE VIDA PARA DIFERENTES COMBUSTIBLES
(Fuente: Elaboración con datos propios y de Biograce II, 2015)

Lo anterior resalta uno de los beneficios potenciales más importantes de la bioenergía y, ante la crisis ambiental y energética actual, las alternativas energéticas que mitiguen las emisiones a la atmósfera de GEI cobran especial relevancia particularmente para el caso de los biocombustibles sólidos dado su potencial en nuestro país.

Cabe mencionar que, Esteban y colaboradores (2014) calcularon con el método CML un factor de emisión de aproximadamente 8.3 gCO₂e/MJ para una cadena productiva de astilla combustible en Cataluña, España, utilizando biomasa del bosque mediterráneo como materia prima. Dicho factor es mayor en con el estimado en el presente trabajo (5.4 gCO₂e/MJ), lo cual puede explicarse en gran medida por el bajo impacto que genera la etapa de transporte debido a las cortas distancias entre la EF y el usuario final.

En lo referente al ciclo de vida del carbón vegetal, la FAO (2017) expone que el factor de emisión de este BCSF regularmente oscila en el rango de los 140 a los 440 gCO₂e/MJ (excluyendo transporte y considerando las emisiones biogénicas). Por su parte, Bailis y colaboradores (2013), estimaron un valor aproximado de 217 gCO₂e/MJ para el ciclo de vida del carbón vegetal con el horno “rabo quente”, mayor también a lo determinado en este trabajo. En otro estudio resultó que se producían 145 gCO₂e/MJ (Afrane & Ntiamoah, 2011). En comparación con los valores encontrados en dichos trabajos, el factor neto estimado en el presente proyecto es un poco menor aún si consideramos al CO₂ como no biogénico (129.3 gCO₂e/MJ).

5.2 Potencial de agotamiento de la capa de ozono

Los factores de emisión estimados en la categoría de impacto de PAO se consideran muy bajos en comparación con otros combustibles o con las fuentes principales emisoras de clorofluorocarbonos, como son aerosoles, refrigerantes y sistemas de aire acondicionado. Para la astilla se calculó un factor de emisión por MJ de energía

de 0.0008 mgCFC-11e, para el aserrín 0.001 mgCFC-11e y para el carbón vegetal 0.0005 mgCFC-11e. Bailis y colaboradores (2013), determinaron un valor de aproximadamente 0.0006 mgCFC-11e para el carbón vegetal, similar a lo encontrado en el presente proyecto.

5.3 Formación de oxidantes fotoquímicos

Se considera que para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, los factores de emisión resultantes para la astilla y el aserrín son mínimos en comparación con otras fuentes energéticas tales como el carbón mineral y el gas LP (2.7 mgC₂H₄e/MJ para la astilla y 1.7 mgC₂H₄e/MJ para el aserrín) (ver Figura 21).

En cambio, de los tres BCSF analizados en el presente trabajo, el carbón vegetal fue el que presentó mayor formación de oxidantes fotoquímicos, teniendo un factor de 247.7 mgC₂H₄e/MJ, siendo éste inclusive mayor al que presenta el gas LP. Sin embargo, el factor de FOF del carbón vegetal sigue siendo mucho menor que el impacto que tendría el carbón mineral dadas sus altas emisiones de metano (ver Tabla 8).

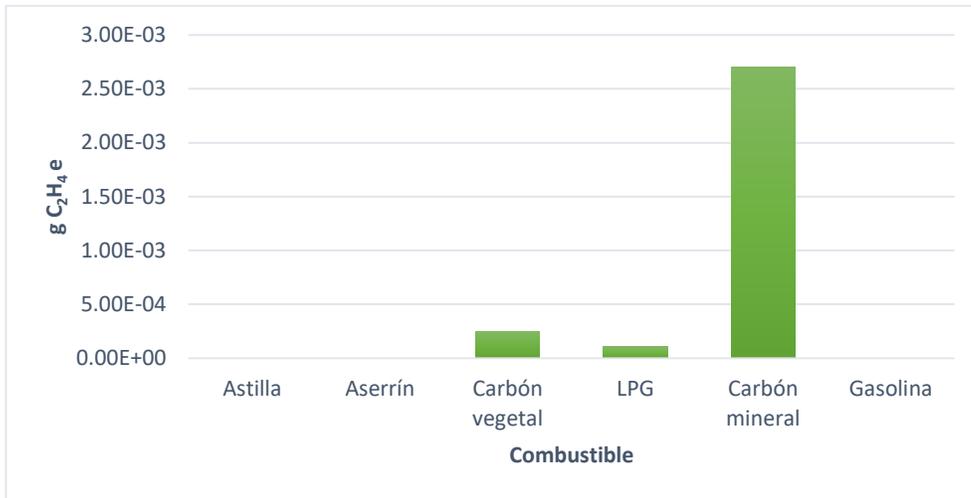


FIGURA 21. POTENCIAL DE FOF DE VARIOS COMBUSTIBLES
(Fuente: Elaboración con datos propios y de Biograce II,2015; Antón 2004)

TABLA 8. POTENCIAL DE FOF DE VARIOS COMBUSTIBLES

Fuente energética	gr C ₂ H ₄ e
Astilla	2.73E-06
Aserrín	1.71E-06
Carbón vegetal	2.48E-04
LPG	1.09E-04
Carbón mineral	2.70E-03
Gasolina	2.10E-11

(Fuente: Elaboración con datos propios y de Biograce II,2015; Antón 2004)

5.4 Tasa de Retorno Energético

Se considera que los tres biocombustibles analizados son energéticamente viables al presentar una TRE mucho mayor a 1 (23:1 para la astilla, 29:1 para el aserrín y 28:1 para el carbón vegetal). La TRE determinada para el carbón vegetal es alta en comparación con lo encontrado por Bailis y colaboradores (2013), quienes estimaron

un valor de 15:1 debido principalmente a la alta demanda de energía necesaria para las etapas de aprovechamiento forestal y producción que el sistema que este último sistema genera.

El hecho de que la astilla presente una TRE menor entre los tres BCSF analizados puede explicarse por la demanda de energía eléctrica en la etapa de *Producción* (principalmente los procesos de aserrío y astillado). En cambio, el hecho de que el carbón vegetal presente una TRE mayor al de la astilla se explica en parte por tener el poder calorífico más elevado. Por su parte, el ciclo de vida del aserrín, al requerir de pocos insumos y energía para su producción, presenta la TRE más elevado.

En la Figura 22 se presenta la TRE de diferentes fuentes energéticas. Como puede observarse, la de los BCSF es inclusive mayor que otras fuentes renovables, tales como la energía eólica, los biocombustibles líquidos, los colectores fotovoltaicos, e inclusive la energía nuclear. Lo anterior puede explicarse porque la materia prima de los BCSF son coproductos de otra actividad económica, lo que reduce los impactos derivados de su producción.

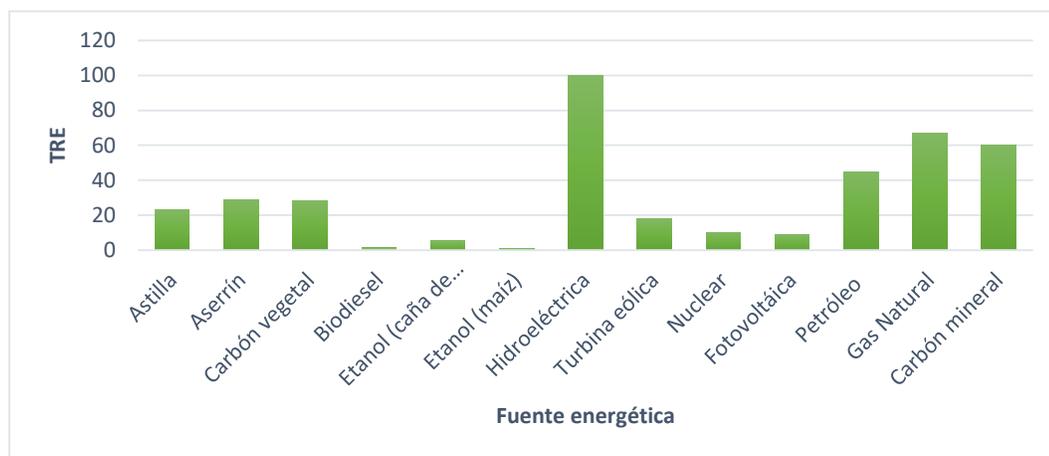


FIGURA 22. TASA DE RETORNO ENERGÉTICO PARA VARIOS COMBUSTIBLES

(Fuente: Elaboración propia con datos propios y de Hall et al., 2014)

No obstante, en comparación con los combustibles fósiles, tanto los BCSF analizados en este trabajo como el biodiesel y el etanol de caña de azúcar y de maíz, presentan una TRE menor. Dado que el agotamiento de las reservas de hidrocarburos ha hecho cada vez más costoso en términos económicos y energéticos la extracción de los mismos, La TRE de los combustibles fósiles ha ido en decremento en las últimas décadas (Hall et al., 2014) (ver Figura 23). Si esta tendencia continúa con el paso de los años se podría suponer que los BCSF lograrían una TRE igual, o incluso mayor, al de los combustibles fósiles, resaltándose aún más la importancia de diversificar la matriz energética nacional.

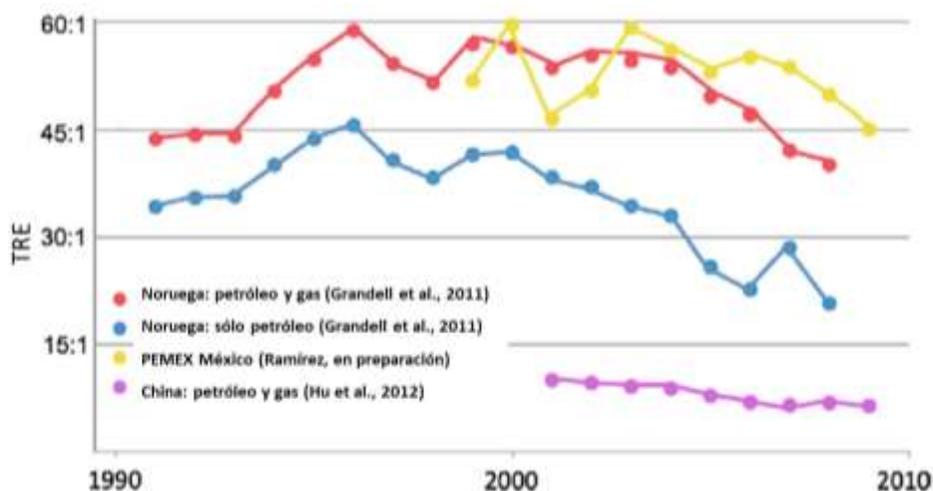


FIGURA 23. DATOS DE SERIES TEMPORALES DE LA TRE PARA DIFERENTES PAÍSES (Fuente: Hall et al., 2014)

Capítulo 6. Conclusiones Finales

En este trabajo se analizaron los potenciales impactos ambientales del aprovechamiento de los productos forestales de astilla, aserrín y carbón vegetal. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El biocombustible que presentó un mejor desempeño ambiental fue el aserrín, tanto para las categorías de cambio climático y formación de oxidantes fotoquímicos, así como la TRE más elevada. Adicionalmente, si bien es la que mayor factor de emisión de clorofluorocarbonos tiene, los otros dos BCSF no presentan un factor muy diferente en las respectivas categorías.
- Para la astilla, las etapas de *Transporte* y *Uso final* son las que contribuyen de manera más significativa en los impactos seleccionados. La aportación generada por la primera etapa puede explicarse por la alta demanda de combustibles e insumos fósiles, lo cual impacta de manera importante en las diferentes categorías de impacto analizadas.
- Pese a que la etapa de *Producción* no es la que mayor impacto genera en las cadenas de astilla y aserrín, sí tiene una aportación porcentual significativa para las cuatro categorías. En ese sentido, se considera relevante analizar maneras para optimizar el uso de energía durante la producción de ambos biocombustibles, así como buscar otras fuentes para la generación eléctrica.
- En lo que respecta al carbón vegetal, las etapas de *Producción*, en específico los procesos de carbonización, y *Uso final* son los que mayor impacto ambiental derivado generan.
- De acuerdo con el análisis de sensibilidad, se concluye que la opción de secar la biomasa de pino con la finalidad de reducir su contenido de humedad

reduciría en gran medida los impactos ambientales derivados del ciclo de vida de la astilla y el aserrín. No obstante, es recomendable analizar si los insumos de energía por la adición de un proceso a la cadena productiva de ambos BCSF, impactaría de manera negativa en la tasa de retorno energética y en los costos de producción.

- El desarrollo de nuevas y más eficientes tecnologías para la combustión, la carbonización e incluso el astillado, desempeñarían un papel fundamental para reducir los impactos ambientales derivados de la producción y uso de BCS. En ese sentido, se considera que sería interesante que en futuras investigaciones se analice la relación costo-beneficio por la implementación de tecnologías de producción y uso eficiente de los BCSF analizados, con la finalidad de contribuir a presentar propuestas integradoras para la empresa; de tal forma que la presente investigación se vincule directamente como una propuesta ejecutiva.
- Se considera relevante destacar la importancia de que el manejo del bosque se lleve a cabo bajo criterios de sustentabilidad. Es decir, permitiendo el uso del crecimiento anual de la biomasa para fines energéticos y no el del stock de carbono, para así, permitir que las emisiones de CO₂ sean neutrales y que la bioenergía represente una verdadera ventaja ambiental.
- Los biocombustibles podrían representar una alternativa potencial para contribuir a la descentralización del sistema energético nacional con beneficios ambientales, y menor contribución a las categorías de cambio climático, potencial de agotamiento de la capa de ozono y formación de oxidantes fotoquímicos que aquéllas fuentes fósiles. Lo anterior siempre bajo el supuesto de que el aprovechamiento forestal se lleva a cabo bajo criterios de sustentabilidad. Así pues, se considera que los BCSF son una posible opción para contribuir a mejorar la seguridad energética nacional ante la disminución de la tasa de retorno energético de los fósiles.

- Lo anterior abre nuevas líneas de investigación relacionadas con la importancia de analizar las cadenas productivas de las alternativas energéticas para que supongan una verdadera ventaja en términos ambientales, sociales y económicos en comparación con el panorama energético actual.
- De confirmarse con mayores estudios el beneficio potencial ambiental de los BCSF con respecto a los combustibles fósiles, sería importante que los gobiernos municipales y estatales revisen las políticas públicas y emprendan acciones, en conjunto con el sector industrial y académico, para promover el aprovechamiento de la biomasa para fines energéticos, priorizando los residuos de la industria, particularmente aquéllos que se conoce tienen menores impactos ambientales derivados. Así, se alienta a que se lleven a cabo esfuerzos a nivel nacional para la reconfiguración de la matriz energética, favoreciendo a las alternativas que generan impactos positivos y mayores beneficios ambientales que aquéllas provenientes de los hidrocarburos.

Referencias

- **Afrane, G., & Ntiamoah, A. (2011).** Comparative Life Cycle Assessment of Charcoal, Biogas and Liquefied Petroleum Gas as Cooking Fuels in Ghana. (Y. University, Ed.) *Journal of Industrial Ecology*, 539-549.
- **Antón, M.** (Utilización del Análisis del Ciclo de Vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero Mediterraneo). *Capítulo 3. Metodología del Análisis del Ciclo de Vida*. Barcelona: 2004.
- **Arias, F. G. (1999).** *El proyecto de investigación: Guía para su elaboración*. (3. E. Reyes., Ed.) Caracas, Venezuela: Editorial Episteme. Oriol Ediciones.
- **Arias, T. C. (2008).** *Construcción y producción de carbón vegetal con hornos mejorados "Rabo Quente"*. México: Naturaleza y Desarrollo NYDE AC. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- **Bailis, R., Rujanavech, C., Dwivedi, P., Vilela, A., Chang, H., & Carnerio, R. (2013).** Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. *Energy for Sustainable Development. Elsevier*(17), 189-200.
- **Biograce II. (2015).** Harmonised Greenhouse Gas Calculations for Electricity, Heating and Cooling from Biomass. *Intelligent Energy Europe*.
- **Donald, W. A. (2005).** *White Paper: Transitioning to a Renewable Energy Future*. Roma, Italia: under contract to the International Solar Energy Society. FAO.
- **Esteban, B., Riba, J.-R., Baquero, G., Puig, R., & Rius, A. (2014).** Environmental assessment of small-scale production of wood chips as a fuel for residential heating boilers. *Renewable Energy. Elsevier*, 106-115.

- **FAO. (2016).** *Forest Product Definitions*. Food and Agriculture Organization, ONU.
- **FAO. (2017).** *The charcoal transition: greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihood*. (F. a. J. van Dam. Rome, Ed.)
- **García, B. C., & Masera, C. O. (2016).** *Estado del arte de la bioenergía en México. Publicación de la Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt*. México: Imagia Comunicación S. de R.L. de C.V.
- **García, C. A., Riegelhaupt, E., & Masera, O. (2013).** Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combustibles fósiles y mitigación de GEI. *Revista Mexicana de Física*, 2(59), 93-103.
- **Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015).** Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews*(42), 712-727.
- **Hall, C. A., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2014).** EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy. Elsevier*(64), 141-152.
- **Hauschild, M. Z. (2018).** Introduction to LCA Methodology. En M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment. Theory and practice*. Springer.
- **Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018).** *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*. Springer.
- **Hauschild, M., & Hujibregts, M. (2015).** Life Cycle Impact Assessment. En W. Klöpffer, & M. Curran, *LCA Compendium - The Complete World of Life Cycle Assessment* (pág. 339). Dordrecht: Springer.

- **Heijungs, R., & Guinée, J. B. (2012).** An Overview of the Life Cycle Assessment Method - Past, Present, and Future. En M. A. Curran (Ed.), *Life Cycle Assessment Handbook. A guide for environmentally sustainable products.* (págs. 15-42). Cincinnati, OH, USA: Scrivener Publishing LLC.
- **Huppes, G., & Curran, M. A. (2012).** Environmental Life Cycle Assessment: Background and Perspective. En M. A. Curran, *Life Cycle Assessment Handbook.* Cincinnati, OH, USA: Scrivener Publishing LLC.
- **IPCC. (2002).** *Climate Change and Biodiversity. Intergovernmental Panel on Climate Change: Technical Paper V.* WMO, UNEP.
- **IPCC. (2011).** *Summary for policymakers and technical summary. IPCC: Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.* (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, . . . C. von Stechow, Edits.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- **IPCC. (2013).** *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, . . . P. Midgley, Edits.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- **IPCC. (2014a).** Climate Change 2014: synthesis report. En R. Pachuari, & L. Meyer, *Core Writing Team.* IPCC, Geneva : Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. .
- **IRENA. (2012).** *Biomass for Power Generation Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Irena Working Paper.* International Renewable Energy Agency. Volume 1: Power Sector. Issue 1/5.

- **IRENA. (2017).** *Renewable Energy and Jobs. Annual Review 2017.* International Renewable Energy Agency.
- **Islas, J., Manzini, F., & Masera, O. (2007).** A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Elsevier. Energy(32)*, 2306-2320.
- **ISO. (2006).** *Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines (ISO 14044).* Geneva: International Organization for Standardization.
- **Johnson, T. M., Alatorre, C., Romo, Z., & Liu, F. (2009).** *México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono (MEDEC).* Washington, DC: Banco Mundial.
- **Laschi, A., Marchi, E., & González-García, S. (2016).** Environmental performance of wood pellets production through life cycle analysis. *Energy. Elsevier(103)*, 469-480.
- **Laurent, A., Espinosa, N., & Hauschild, M. Z. (2018).** Chapter 26. LCA of Energy Systems. En M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment. Theory and Practice.* Springer .
- **Lesme, R. J., & Oliva, L. (2010).** Potencial energético de los residuos de la industria de la madera en el aserrío "El Brujo" de la empresa Gran Piedra Baconao, para la generación de energía eléctrica a partir de un grupo gasificador-motor de combustión interna - generador eléctrico. (F. d. Centro de Estudios de Eficiencia Energética, Ed.) *Tecnología Química, XXX(1)*.
- **Masera, C. O., Coralli, F., García, B. C., Riegelhaupt, E., Arias, C. T., Vega, G. J., . . . Cecotti, L. (2011).** *La bioenergía en México. Situación actual y perspectivas* (Vol. Cuaderno Temático No. 4). México: Red Mexicana de Bioenergía, A.C.
- **Masera, C. O., García, B. C., Riegelhaupt, E., Odenthal, J., Martínez, B. R., Arias, C. T., & Cohen, S. D. (2017).** *Estudio de viabilidad, barreras e impactos de*

opciones de aprovechamiento de recursos forestales para energía renovable (ENERFOR). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). CONACYT. Secretaría de Energía. .

- **Masera, O., Aguillón, J., Fuentes, A., Ghilardi, A., Riegelhaupt, E., Saldaña, R., . . . de Buen, O. (2004).** *La Bioenergía en México: Un Catalizador del Desarrollo Sustentable*. México: Red Mexicana de Bioenergía. Comisión Nacional Forestal.
- **OLADE. (2008).** *Informe de Estadísticas Energéticas 2007*. Quito, Ecuador: Organización Latinoamericana de Energía.
- **Ordóñez, J., Galicia, A., Venegas, N., Hernández, T., Ordóñez, M., & Dávalos-Sotelo, R. (2005).** Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, 21.
- **Ravishankara, A., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. (2009).** Nitrous Oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*.
- **Rosenbaum, R. (2017).** Selection of impact categories, category indicators and characterisation models in goal and scope definition. En M. (. Curran, *LCA Compendium - The Complete World of Life Cycle Assessment - Goal and scope definition in Life Cycle Assessment*. Dordrecht: Springer.
- **Rosenbaum, R. K., Hauschild, M., Boulay, A.-M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., & Vieira, M. (2018).** Chapter 10. Life Cycle Impact Assessment. En M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*. Springer.
- **Rousset, P., Caldeira-Pires, A., Sablowski, A., & Rodrigues, T. (2011).** LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier(19), 1647-1653.

- **SEMARNAT. (2014).** *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2013*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- **SENER. (2016).** *Balance Nacional de Energía 2015*. México: Secretaría de Energía. Secretaría de Planeación y Transición Energética. Dirección General de Planeación e Información Energéticas.
- **SENER. (s.f.).** *Atlas Nacional de Biomasa*. México: Secretaría de Energía. Comisión Federal de Electricidad. .
- **Udo de Haes, H. (1996).** *Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment. Report of the SETAC-Europe Workgroup on Life Cycle Impact Assessment*. Brussels, Belgium: SETAC.
- **Van Loo, S., & Koppejan, J. (2008).** *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing*. London., UK Sterling, VA, USA: EARTHSCAN.
- **Wolf, F., & Vogel, E. (1986).** Características del carbón vegetal en algunas especies madereras del Noreste de México. *Ciencia Forestal*, 11.

