

2023

Evaluación del cumplimiento del estándar RSB-STD-12-001 de
nuevos procesos de producción de biocombustibles de aviación
mediante GREET **Ing. Karen Katherine Cota Cárdenas**



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Evaluación del cumplimiento del estándar RSB-STD-12-001 de nuevos procesos de producción de biocombustibles de aviación mediante GREET

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ingeniería en Calidad y Productividad

Presenta

Ing. Aero. Karen Katherine Cota Cárdenas

Dirige:

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Querétaro, Qro. a 25 de enero de 2024



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Evaluación del cumplimiento del estándar RSB-STD-
12-001 de nuevos procesos de producción de
biocombustibles de aviación mediante GREET

por

Karen Katherine Cota Cardenas

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-309217



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Evaluación del cumplimiento del estándar RSB-STD-12-001
de nuevos procesos de producción de biocombustibles de
aviación mediante GREET

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería en Calidad y Productividad

Presenta

Ing. Aero. Karen Katherine Cota Cárdenas

Dirige:

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Presidente

Dr. Sergio Iván Martínez Guido

Secretario

Dra. Araceli Guadalupe Romero Izquierdo

Vocal

Dr. Oscar Daniel Lara Montaña

Suplente

Mtra. Valeria Caltzontzin Rabell

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

25 de enero de 2024

i. Dedicatoria

A mi madre Fátima y hermanas Ahtziri y Abigail por su inmenso amor y apoyo.

A mis amigos de maestría por todas las risas.

A mis profesores por su guía en este camino académico.

ii. Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo para realizar mis estudios de posgrado.

iii. Resumen

El sector de la aviación es responsable del 2 % de CO₂ emitidos hacia la atmósfera, es por esto por lo que se han establecido estrategias para reducir su impacto ambiental; en este contexto, el combustible renovable de aviación (SAF por sus siglas en inglés) se posiciona como una alternativa más promisorio en el corto y mediano plazo. También conocido como bioturbosina, el SAF puede ser producido a partir de diferentes biomásas tales como plantas no combustibles, desechos forestales o microalgas. Actualmente se han certificado 7 rutas de procesamiento para la producción de este combustible. Sin embargo, por provenir de una fuente no fósil no significa que produce un menor impacto negativo, siendo necesario evaluar su efecto. La metodología Análisis de Ciclo de Vida permite evaluar el impacto ambiental de todo un proceso productivo, desde la generación de las materias primas hasta su uso final. Para que un combustible sea considerado sustentable debe pertenecer al Esquema de Reducción y Eliminación de Carbono de la Aviación Internacional (CORSIA por sus siglas en inglés) y cumplir con los requerimientos del estándar RSB-STD-12-001. Así, en este proyecto se realizó un análisis de ciclo de vida para la ruta de procesamiento de Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados en su versión convencional, integrada e intensificada para determinar si cumplen con lo establecido dentro del esquema de RSB-STD-12-001. Los resultados muestran que las tecnologías integradas e intensificadas presentan una reducción en el impacto ambiental mayor al 10 %, respecto de la línea base asociada a la producción de turbosina de origen fósil. Por lo tanto, ambas tecnologías cumplen con a la especificación del estándar. Cabe destacar la reducción .15 % para el caso de la tecnología integrada de hidroprocesamiento, respecto de las tecnologías intensificadas.

iv. Abstract

The aviation sector is responsible for 2% of the CO₂ emitted into the atmosphere, which is why strategies have been established to reduce its environmental impact, renewable aviation fuel (SAF) is positioned to be the ideal solution. Also known as bio-jet, it can be produced from different biomasses such as non-combustible plants, forest waste or microalgae. Currently, 7 processing routes have been certified to produce this fuel. However, the fact that it comes from a non-fossil source does not mean that it produces less negative impact, so it is necessary to evaluate its effect. The Life Cycle Analysis methodology allows the evaluation of an entire process from harvesting to final use and measuring its impact on the environment. For a fuel to be considered sustainable, it must belong to the Carbon Reduction and Removal Scheme for International Aviation (CORSIA) and comply with the requirements of the RSB-STD-12-001 standard. For the following project, a life cycle analysis was performed for the processing route of Esters and Hydroprocessed Fatty Acids in its conventional, integrated, and intensified version to determine if they comply with the requirements of the RSB-STD-12-001 scheme. The results show that the integrated and intensified technologies do show a reduction in environmental impact of more than 10 % with respect to the baseline associated with the production of fossil fuels. Therefore, both technologies comply with the standard specification. It is important to highlight the significant reduction of 15 % in the case of the integrated hydroprocessing technology, with respect to the intensified technologies.

Índice General

i.	Dedicatoria.....	i
ii.	Agradecimientos.....	ii
iii.	Resumen.....	iii
iv.	Abstract.....	iv
1.	Introducción.....	1
2.	Antecedentes.....	3
2.1.	Aviación y cambio climático.....	3
2.2.	Biocombustible.....	5
2.3.	Sustentabilidad en los procesos.....	6
2.4.	Revisión del estado del arte.....	7
2.5.	Fundamento teórico.....	11
2.5.1.	Combustible de aviación obtenido de fuentes renovables.....	11
2.5.2.	Procesos de producción de bioturbosina.....	14
2.5.3.	Intensificación de procesos.....	15
2.5.4.	Integración de energética procesos.....	16
2.5.5.	Estándar RSB-STD-12-001.....	16
2.5.6.	Análisis de ciclo de vida.....	17
2.5.7.	Diseño de experimentos.....	19
3.	Planteamiento del problema.....	20
4.	Justificación.....	21
5.	Hipótesis.....	22
6.	Objetivos.....	22
6.1.	Objetivo General.....	22
6.2.	Objetivos específicos.....	23
7.	Materiales y métodos.....	23
7.1.	Selección de procesos de producción de biocombustible de aviación.....	24
7.2.	Determinación del objetivo y alcance del ACV, así como la unidad funcional.....	25
7.3.	Generación del inventario a partir de la unidad funcional y los procesos de producción.....	25

7.4.	Cálculo de emisiones por etapa a partir del estándar RSB-STD-12-001	25
7.5.	Análisis de Resultados e interpretación de resultados	26
8.	Resultados y discusión	26
8.1.	Hidroprocesamiento	26
8.2.	Objetivo y alcance del análisis de ciclo de vida	28
8.3.	Inventario	29
8.3.1.	Cultivo de la materia prima	30
8.3.2.	Acondicionamiento de la materia prima	34
8.3.3.	Extracción y procesamiento de la biomasa	35
8.3.4.	Traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible	37
8.3.5.	Proceso de conversión de la materia prima en combustible	38
8.3.6.	Traslado y distribución del combustible	42
8.3.7.	Uso del biocombustible	44
8.4.	Emisiones por etapa a partir del estándar RSB-STD-12-001	45
8.4.1.	Cultivo de la materia prima	46
8.4.2.	Acondicionamiento de la materia prima	47
8.4.3.	Extracción y procesamiento de la biomasa	48
8.4.4.	Traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible	48
8.4.5.	Proceso de conversión de la materia prima en combustible	49
8.4.6.	Traslado y distribución del combustible	50
8.4.7.	Uso del combustible	51
9.	Conclusiones	54
10.	Referencias	56

Índice de Tablas

Tabla 1 Análisis de ciclo de vida realizados para la producción de SAF mediante HEFA	8
Tabla 2 Propiedades del combustible convencional y biocombustibles	12
Tabla 3 Rutas de procesamiento certificadas de biocombustible de aviación.....	14
Tabla 4 Datos básicos sobre el biocombustible de aviación	31
Tabla 5 Cantidades necesarias de fertilizantes y pesticidas	32
Tabla 6 Emisiones por uso de fertilizantes.....	33
Tabla 7 Emisiones por uso de pesticidas	33
Tabla 8 Requerimiento energético de sierra manual.....	33
Tabla 9 Emisiones de la poda	34
Tabla 10 Datos de descascarillado de JC	35
Tabla 11 Emisiones del proceso de descascarillado 1y 2	36
Tabla 12 Datos del prensado mecánico	36
Tabla 13 Emisiones por el prensado mecánico.....	37
Tabla 14 Datos para la conversión de combustible.....	37
Tabla 15 Emisiones por la producción y consumo de combustible	38
Tabla 16 Requerimientos eléctricos para HEFA Convencional	40
Tabla 17 Emisiones por HEFA convencional en kg	40
Tabla 18 Requerimientos eléctricos para HEFA intensificado	41
Tabla 19 Emisiones por HEFA intensificado en kg	41
Tabla 20 Requerimientos eléctricos para HEFA integrado	42
Tabla 21 Emisiones por HEFA integrado en kg	42
Tabla 22 Datos para conversión de combustible.....	43
Tabla 23 Producción y consumo de combustible	43
Tabla 24 Datos de bomba eléctrica.....	44
Tabla 25 Emisiones producidas por la combustión de Jatropha C.....	45
Tabla 26 Emisiones producidas por la combustión de Jatropha C. al 50 %.....	45
Tabla 27 Conversión de emisiones a kgCO ₂	46

Tabla 28 Emisiones del cultivo de la materia prima	47
Tabla 29 Emisiones por la extracción y procesamiento de la materia prima	48
Tabla 30 Emisiones por el traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible.....	49
Tabla 31 Emisiones producidas por la conversión a SAF	50
Tabla 32 Emisiones por el traslado y distribución	50
Tabla 33 Emisiones por uso del combustible	51
Tabla 34 Emisiones totales de la conversión de Jatropha Curcas	51

Índice de Figuras

Figura 1 Metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.	24
Figura 2 Alcance del análisis de ciclo de vida	28
Figura 3 Programa GREET	30
Figura 4 Cultivo de la materia prima	31
Figura 5 Acondicionamiento de la materia prima	34
Figura 6 Extracción y procesamiento de la materia prima	35
Figura 7 Traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible	37
Figura 8 Proceso de conversión a biocombustible.....	39
Figura 9 Traslado y distribución del combustible	43
Figura 10 Uso del combustible.....	44
Figure 11 Análisis de ciclo de vida para bioturbosina a partir de Jatropha C.	54

1. Introducción

El sector de la aviación contribuye con el 2 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Por ello, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA por sus siglas en inglés) estableció estrategias para contrarrestar este impacto negativo al medio ambiente; dichas estrategias incluyen diseñar aeronaves más eficientes con el consumo de combustible, desarrollar combustibles renovables e identificar mejoras en la administración de los aeropuertos. Sin embargo, el combustible sustentable de aviación (SAF por sus siglas en inglés) apunta a ser la opción más promisoría para resolver esta problemática (Song et al., 2023).

El SAF, también conocido como bioturbosina, está conformado por hidrocarburos renovables en el rango del carbono ocho al dieciséis, cuyas propiedades, en comparación a su contra parte fósil, son las mismas o en algunos casos superiores (C. Gutiérrez-Antonio et al., 2017). Este biocombustible puede ser producido a partir de diferentes materias primas que incluyen cultivos no comestibles, desechos de animales y residuos forestales. Específicamente, dentro de las biomásas de mayor uso se encuentra la *Jatropha curcas* (*J. Curcas*), ya que es una planta no comestible, que crece en tierras marginales y tiene un tiempo de vida de 50 años (Gómez-Castro et al., 2023).

La bioturbosina de aviación es producido mediante diferentes procesos de conversión que dependen directamente del tipo de biomasa y de sus propiedades fisicoquímicas. Sin importar el tipo de proceso o la materia prima, todos los biocombustibles de aviación son estudiados para evaluar su desempeño y seguridad. La Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) es el organismo encargado de certificar estos combustibles y sus procesos de conversión. Hasta el año 2021, la ASTM ha certificado 7 rutas de procesamiento (Wang et al., 2016), siendo éstas:

1. Queroseno Parafínico Sintético Fischer-Tropsch (FT SPK)
2. Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados (HEFA)
3. Iso-Parafinas Sintéticas (SIP)
4. Queroseno Parafínico Sintético más Aromáticos (SPK/A)
5. Queroseno derivado de Alcohol (ATJ)
6. Queroseno producido por Hidrotermólisis Catalítica (CH-SK)
7. Hidrocarburos-Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados (HHC-SPK)

De las todas las tecnologías de procesamiento, el hidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos (HEFA) destaca sobre el resto, ya que es el único proceso completamente comercial, además de proporcionar mayores rendimientos en la conversión. Sin embargo, a pesar de provenir de una fuente renovable, el biocombustible de aviación debe asegurar que su procesamiento y uso no causarán mayor impacto ambiental negativo. Para ello, este biocombustible debe ser elegible por el Esquema de Reducción y Eliminación de Carbono de la Aviación Internacional (CORSIA por sus siglas en inglés); este esquema tiene el propósito de reducir las emisiones del sector de la aviación. Por otro lado, para que el SAF sea candidato para CORSIA debe cumplir con la certificación RSB-STD-12-001, donde se indican los requerimientos específicos para el biocombustible (RSB, 2021).

Es este contexto, la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite cuantificar el impacto ambiental de este biocombustible considerando desde la producción de la materia prima hasta su uso en las aeronaves; de esta manera, la información generada en el análisis permite identificar las áreas de oportunidad para reducir el impacto ambiental asociado a su producción (Gómez-Castro et al., 2023).

Con el objetivo de mejorar el rendimiento y reducir el consumo de energía de los procesos de producción de biocombustible se ha propuesto la intensificación e integración de procesos; estas estrategias se han aplicado a las rutas de procesamiento para el combustible renovable de aviación, específicamente para la

ruta HEFA utilizando como materia prima *J. Curcas*. En este contexto, se han realizado nuevas propuestas de procesos de producción intensificados. También se han aplicado estrategias de integración energética a dichos procesos de producción, tanto convencionales como intensificados. Dichas propuestas cumplen con los requisitos de las normas ASTM; sin embargo, aún no se han realizados los estudios correspondientes para determinar con su cumplimiento al estándar RSB-STD-12-001 (Romero-Izquierdo et al., 2017).

Por ello, en el presente trabajo se presenta la evaluación del cumplimiento del estándar RSB-STD-12-001 para los procesos intensificados e integrados de la ruta de procesamiento HEFA utilizando como materia prima *J. Curcas*, aplicando la metodología de análisis de ciclo de vida mediante el uso del software GREET. Los resultados obtenidos son comparados con el proceso convencional.

2. Antecedentes

2.1. Aviación y cambio climático

La industria aeronáutica es uno de los sectores que hoy en día busca la mejora en términos de calidad y sustentabilidad. En el 2019, la IATA reportó que el sector de la aviación tuvo ingresos de 873 mil millones de dólares, y generó casi 3 millones de empleos a nivel mundial. Sólo en México, la industria área emplea alrededor de 278,000 personas (IATA, 2018). Asimismo, se estima que para el 2030, el tráfico aéreo aumentará anualmente, entre 1.5 % a 3 % (IATA, 2019). Por otro lado, dicho sector fue responsable del 2 % del total de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) antropogénicas en el 2019, por lo que se considera dentro de las principales industrias que contribuyen a la emisión de los gases de efecto invernadero; demostrando que, pese a los esfuerzos de las estrategias de manejo de calidad implementadas en dicho sector, no ha sido posible garantizar un desempeño sustentable que complemente la mejora continua (Asmelash et al.,

2020). Por lo que, en 2009, la IATA definió tres metas para abordar el problema del cambio climático y garantizar así el desarrollo sustentable del sector. La primera meta es mejorar la eficiencia de los motores de las aeronaves en 1.5 % anual. La segunda meta consiste en alcanzar una neutralidad de carbono; es decir, las reducciones de las emisiones de CO₂ deben coincidir con aquellas que se generan por la quema del combustible. Finalmente, la tercera meta es reducir las emisiones de CO₂ al 50 % para el año 2050, respecto de los niveles de emisiones del 2005 (IATA, 2021). Para alcanzar estas metas, la IATA desarrolló la estrategia de los cuatro pilares, los cuales se mencionan a continuación (IATA, 2019):

1. Tecnología para desarrollar aeronaves y motores más eficientes que reduzcan las emisiones de CO₂.
2. Desarrollar un combustible sustentable para la aviación.
3. Operaciones/infraestructura, incluyen identificar mejoras en el manejo de los aeropuertos y hacer un mejor uso del espacio aéreo.
4. Compensación por emisiones de carbono, para garantizar la neutralización de CO₂ en la industria.

Aunado a los desafíos de reducir las emisiones de CO₂, en el 2020 la aviación sufrió un declive ocasionado por la pandemia COVID-19. De acuerdo con el reporte para la mejora del medio ambiente emitido por la IATA, el 2020 es considerado el peor año en la historia de la aviación. La demanda mundial se redujo un 65.9 %, y los ingresos totales descendieron un 69 % con pérdidas de 126, 400 millones de dólares (IATA, 2021). En este contexto, el sector de la aviación enfrenta su recuperación sostenible, dentro de la cual el biocombustible de aviación se identifica como la estrategia más promisoría para cumplir una transición energética bajo un esquema de calidad continua.

2.2. Biocombustible

El combustible renovable de aviación también se conoce como bioturbosina, combustible sustentable de aviación, bioqueroseno, o queroseno parafínico sintético (SPK por sus siglas en inglés) (Gutiérrez-Antonio, 2021).

El SAF puede producirse a partir de diferentes tipos de biomásas mediante diversas rutas de procesamiento. Sin importar la materia prima o la ruta de procesamiento, el biocombustible de aviación debe cumplir con certificaciones tanto técnicas como ambientales. Dentro de las certificaciones técnicas se encuentra el estándar ASTM D7566 (2021), que establece las especificaciones del combustible de aviación que es producido tanto de manera convencional (de origen fósil) como mediante procesos alternos (sintéticos provenientes de biomasa). Este estándar incluye anexos que especifican los porcentajes máximos de biocombustible que pueden emplearse en mezclas con turbosina de origen fósil; cabe mencionar que el biocombustible de aviación debe cumplir con las propiedades especificadas en el estándar ASTM D1655 (2021), que es el mismo que se emplea para evaluar el combustible de origen fósil. Adicionalmente, en el estándar ASTM D7566 se establecen las materias primas y procesos de producción certificados para la producción de combustible renovable de aviación que puede ser empleado en vuelos comerciales, tanto de transporte de mercancías como de pasajeros.

Por otra parte, la bioturbosina debe ser un combustible elegible por CORSIA. Este esquema fue propuesto por la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) con el objetivo de reducir las emisiones de carbono del sector de la aviación. A su vez, para que el combustible sea elegible para CORSIA debe cumplir con la certificación RSB-STD-12-001 (RSB, 2021). Este estándar es relevante dado que las emisiones derivadas de la aviación en vuelos dentro de cada país se encuentran consideradas bajo el Acuerdo de París; sin embargo, las emisiones derivadas de los vuelos internacionales están cubiertas por la ICAO. Las aerolíneas pueden utilizar combustibles elegibles para CORSIA con menos emisiones de CO₂. A partir de

2021, los operadores de aerolíneas pueden reducir sus requisitos de compensación de emisiones al emplear combustibles elegibles por CORSIA. Por ello, es de gran importancia el diseño de procesos que permitan producir el combustible renovable de aviación con reducidas emisiones y precios competitivos; estos combustibles elegibles para CORSIA contribuirán de manera significativa a la recuperación sostenible del sector de la aviación. Para determinar si los nuevos procesos de producción generan combustible elegible para CORSIA deben cumplir el estándar ASTM D7566, así como el RSB-STD-12-001.

En este contexto, se han realizado nuevas propuestas de procesos de producción intensificados e integrados (Dimian et al., 2014). Estos biocombustibles satisfacen el estándar ASTM D7566; no obstante, dado que aún se encuentran en fase de diseño es importante evaluar si los nuevos procesos logran reducir en mayor medida las emisiones indicadas en el estándar RSB-STD-12-001.

2.3. Sustentabilidad en los procesos

Hoy en día, no sólo se buscan procesos eficientes y con mínimos desperdicios, sino también procesos con un enfoque ambiental. Lo que implica desarrollar productos que no requieran un exceso de materia prima, agua o que liberen sustancias dañinas al aire o suelo al ser manufacturados (Vinodh, 2010). Es por esto que se han aplicado diferentes estrategias que monitorean el impacto que un producto o proceso puede tener durante su vida útil y reducir su impacto negativo. A continuación, se presentan algunos.

La empresa estadounidense “Energy Star” desarrolló un método llamado “The Energy Treasure Hunt” para identificar oportunidades de ahorro, y por ende reducir los desperdicios de energía eléctrica. Permitiendo que la organización mantenga una cultura de mejora continua para aplicar medidas de control energético que reduzcan el uso, costo y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas (U.S. Environmental Protection Agency, 2014).

El modelo de reducción de desperdicios (WARM por sus siglas en inglés) fue desarrollado con la Agencia Estadounidense para la Protección del Medio Ambiente. WARM calcula las emisiones de gases de efecto invernadero, energía, impacto económico para crear un escenario base, y así identificar alternativas para el manejo de residuos y reducción de emisiones e impactos de energía (EPA 2020).

El ACV es la metodología descrita por la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) a través de la norma ISO 14040:2006 de análisis de ciclo de vida. El ACV es una herramienta sistemática atractiva para categorizar los impactos ambientales (Han et al., 2013). Esta herramienta evalúa el impacto ambiental de un producto o proceso a través de toda de vida útil con una perspectiva de la cuna a la tumba.

Cada metodología ofrece diferentes perspectivas para monitorear el impacto de un proceso; sin embargo, el análisis de ciclo de vida destaca en que amplía este enfoque considerando el impacto ambiental potencial que un producto puede tener en la fase de fabricación, además del consumo de las materias primas, el uso que se le da al producto y la manera en que éste se desecha. Esta herramienta ha sido aplicada plenamente para valorar el impacto de los procesos de producción de biocombustible para aviación.

2.4. Revisión del estado del arte

Se han realizado distintos análisis de ciclo de vida enfocados a los procesos de producción de biocombustible de aviación, cada uno de ellos con diferentes aplicaciones y perspectivas. Han (2013) presentó un ACV enfocado en el biocombustible de aviación proveniente de aceite de semillas y maíz a través de los procesos de Hidrotratamiento y Fischer-Tropsch. Dicho estudio tuvo como resultado que el biocombustible producido por estos procesos presenta una reducción de gases de efecto invernadero entre 41 % y 63 % para el proceso de hidrotratamiento, mientras que el combustible obtenido por Fischer-Tropsch de 89 %, con respecto a

su contraparte fósil. Además, se han realizado diversos análisis de ciclo de vida, explorando diferentes materias primas (como *J. Curcas*, camelina, maíz o algas).

Específicamente para el proceso de Hidrotratamiento, siendo una tecnología madura y completamente comercial, se han dedicado esfuerzos para estudiar directamente su impacto ambiental. Algunos de los ACV se encuentran en la Tabla 1. De acuerdo con la revisión mostrada en la Tabla 1, se observó una reducción considerable en las emisiones de efecto invernadero, entre el 23 % - 76 %, en comparación contra su contraparte fósil. La cantidad total de reducción depende considerablemente de factores como el uso de fertilizantes, la distancia entre los lugares de producción, entre otros. Dentro del conjunto de materias primas las más utilizadas son la *J. Curcas* y la camelina; esto se debe a que ambas son plantas no comestibles, y se componen de un alto contenido de triglicéridos y pueden crecer en tierras marginales.

Tabla 1. Análisis de ciclo de vida realizados para la producción de SAF mediante HEFA

Autor Referencia	Materia Prima	Tipo de ACV	Consideraciones de impacto del ACV	Principales contribuidores	Resultados del ACV
Bailis & Baka (2010)	<i>Jatropha curcas</i>	Pozo a la tumba	Emisiones GHG	Adquisición de materia prima	55% de reducción de las emisiones de GHG
Handler et al. (2014)	Algas	Cuna a la tumba	Emisiones GHG	Deshidratación de cultivos de algas	44% de reducción de las emisiones de GHG
Li & Mupondwa (2014)	Camelina	Cuna a la tumba	GWP	Cultivo de materias primas	Diésel: de 7.61 a 24.72 g CO ₂ eq por MJ bioturbosina: de 3.06 a 31.01 g CO ₂ /MJ
Meyer et al. (2012)	<i>Jatropha curcas</i>	Cuna a la tumba	Emisiones GHG	Procesos de cultivo y conversión	50% de reducción de las emisiones de GHG

Guo et al. (2016)	Microalgas	Pozo a la tumba	Emisiones GHG Consumo total de energía	Cultivo de materias primas	Mayor consumo de energía a partir de microalgas 11.57–41.44%
Guo et al. (2017)	Microalgas	Pozo a la tumba	Emisiones GHG	Producción y utilización	76% de reducción de las emisiones de GHG
Sadhukhan & Sen (2021)	No se especifica	Pozo a la tumba	GWP	Conversión de materias primas	Se calcula que se ahorran 108 kt CO ₂ equivalente al año de calentamiento global y 1.44 PJ al año de energía fósil
Shi et al. (2017)	Brassica napus	Cuna a la tumba	Utilización del agua	Cultivo de materias primas	Uso de agua 131–143 m ³
O'Connell et al. (2019)	Brassica napus, Girasol, Soja y aceite de palma	Del pozo a la rueda	Emisiones GHG	Cultivo de materias primas	Puede producir 18.1 g CO _{2eq} /MJ
Capaz & Seabra (2016)	Caña de azúcar Soja Residuos de madera Sebo de bovino Aceite de cocina usado	Pozo a la tumba	Emisiones GHG	Cultivo de materias primas	Reducción de las emisiones GHG de 55%-65%
Resurreccion et al. (2021)	Camelina	Pozo a la tumba	Emisiones GHG	Proceso de conversión	Reducción de emisiones GHG 23.34%
Bio4A (2019)	Camelina	Pozo a la tumba	Emisiones GHG	Biorrefinería y transporte	73-87% de reducción de las emisiones de GHG
Vásquez et al. (2019)	Aceite de palma Aceite de soja	Pozo a la tumba	Emisiones GHG	Cultivo de materias primas	Escenarios normales Aceite de palma: 85% de reducción de las emisiones

					de GHG Soja: 57% de reducción de las emisiones de GHG Escenarios de mejora Aceite de palma: 95% de reducción de las emisiones de GHG Soya: 63% de reducción de las emisiones de GHG
Abrantes et al. (2021)	Varios	Pozo a la tumba	Evalúa el impacto ambiental desde dos perspectivas: Mejoras tecnológicas y SAF	Cultivo de materias primas	Las mejoras tecnológicas pueden reducir hasta un 15% las emisiones de CO ₂ HEFA SAF produce entre 13.9 y 60 gCO _{2eq} /MJ
Vela-García et al. (2021)	Biomasa lignocelulósica; Aceites vegetales	Cuna a la puerta	Emisiones GHG	Fuente y consumo de hidrógeno durante las etapas de descarboxilación e hidroprocesamiento	Emisiones GHG 18 gCO _{2eq} /MJ
Guo et al. (2016)	maíz; cultivos azucareros; cultivos oleaginosos; cultivos energéticos celulósicos	No se especifica	Emisiones por cambio de uso del suelo en un período de 25 años	Cultivo de materias primas	LUC 34.6 g CO _{2eq} MJ ⁻¹
Lokesh et al. (2015)	Camelina <i>Jatropha curcas</i> Microalgas	Cuna a la tumba	Emisiones del ciclo de vida (ECV)	Uso de tierra de cultivo	Ahorros ACV: Camelina SPK 70%; Microalgas SPK 58% y Jatropha SPK 64%

Ong et al. (2021)	Biomasa lignocelulósica	Cuna a la tumba	Análisis técnico económico (TEA) Huella de emisiones GHG	Cultivo de materias primas	Proceso Normal Costo de producción \$9.0/L-Jet- A_{eq} Huella de emisiones GHG 61.4 gCO _{2eq} /MJ Proceso optimizado Costo del producto \$1.5/L-Jet- A_{eq} Huella de emisiones GHG 18.3 gCO _{2eq} /MJ GHG
Prussi et al. (2021)	Algas	Cuna a la puerta	Emisiones GHG	Cultivo de materias primas	68% de reducción de las emisiones de GHG
Ringsred et al. (2021)	Residuos forestales y pellets de madera	Pozo a la tumba	Emisiones GHG	Producción de combustible	Reducciones basadas en escenarios E1: 71% E2: 70% E3: 68%

2.5. Fundamento teórico

2.5.1. Combustible de aviación obtenido de fuentes renovables

Un biocombustible es aquel combustible que proviene de la biomasa correspondiente al ciclo corto del carbono, tanto de origen vegetal como animal (comestible, no comestible o residual) (Rodionova et al., 2017). Las ventajas principales de los biocombustibles incluyen poca contaminación, generación local, carácter renovable y confiable (Demirbas, 2008). De manera similar a los combustibles fósiles, los biocombustibles se presentan en forma sólida, líquida y gaseosa (Guo, Song, y Buhain 2015). En particular, el SAF es la alternativa del combustible fósil de bajo contenido de carbono para la industria de la aviación. Este biocombustible no es derivado del petróleo, y se produce a partir de materias de origen biológico (RSB, 2020).

El biocombustible de aviación, también conocido como bioturbosina, cumple con las características del combustible convencional, tales como el rendimiento a baja temperatura, bajo punto de inflamación, bajo punto de congelación y buena estabilidad térmica (Kandaramath Hari, Yaakob, y Binitha 2015); actualmente, el combustible para aviación que se utiliza es el queroseno, que se produce como un corte petróleo en la destilación fraccionada (Yilmaz y Atmanli 2017). En la Tabla 2 se muestra la comparación de las propiedades del combustible convencional contra el combustible sustentable de aviación. Se puede observar que las propiedades del queroseno parafínico sintético son idénticas, o en algunos casos, superiores a las del combustible convencional; además, el biocombustible de aviación produce menos emisiones de CO₂ durante su ciclo de vida (Gutiérrez-Antonio, 2021).

El biojet está formado por hidrocarburos renovables en el rango del C8 al C16, y consta principalmente de parafinas y naftenos (Rodionova et al., 2017). La principal diferencia de la bioturbosina con el combustible fósil radica en el contenido de compuestos aromáticos, la cual depende tanto de la biomasa empleada como de la ruta de producción. El contenido de compuestos aromáticos no afecta las propiedades del biocombustible de aviación; sin embargo, dado que la norma exige un mínimo de 8.4 % en volumen de compuestos aromáticos en el tanque de las aeronaves, el contenido de dichos compuestos en la bioturbosina determina el máximo volumen que puede ser usado en mezclas. Este volumen varía desde 10 % hasta 50% máximo (Demirbas, 2008).

Tabla 2. Propiedades del combustible convencional y biocombustibles

Propiedad	Combustible fósil	Biocombustible
Tipo de combustible	Queroseno	Queroseno parafínico sintético (SPK)
Rango de ebullición (°C)	170-300	172-243
Temperatura de congelación (°C)	-40	-57
Punto de inflamación (38 °C min)	38	46.5
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	775-840	751-840

Viscosidad a - 20°C (8 mm ² /s max)	8.0	3.66
Contenido energético (MJ/kg)	43.28	44.3

Las principales materias primas para la producción del biocombustible de aviación son materias de segunda generación, estas son aquellas que no compiten con la industria de la alimentación ni por el uso de las tierras. Estas materias son cultivos energéticos y consumen menos recursos, esta generación incluye materias residuales como los aceites de cocina usados o la biomasa de la agroindustria. Además de los cultivos no comestibles como lo son *J. curcas*, camelina, microalgas (Du et al., 2019). En particular, *J. Curcas* es una planta energética no comestible, la cual puede crecer en tierras de escasa fertilidad, por lo que no presenta un riesgo para los cultivos alimentarios. Camelina es también una planta no comestible con alto contenido de aceite, mientras que las microalgas presentan alto contenido de lípidos, gran absorción de CO₂ y alta tasa de generación de biomasa. Los residuos de plantas, animales o madera son de bajo costo y fáciles de adquirir, y en su mayoría están compuestos por material lignocelulósico. Las principales ventajas de las materias primas antes mencionadas incluyen su procedencia de fuentes renovables e incluso residuales, que al ser no comestibles no ponen en riesgo la seguridad alimentaria; asimismo, al ser convertidas en biocombustible de aviación permiten reducir las emisiones de CO₂ y el biocombustible producido a partir de ellas es compatible con el combustible convencional (Kandaramath Hari et al., 2015).

En particular, *J. curcas* es una opción promisorio para la producción de combustible renovable de aviación. Es un cultivo energético, ya que requiere poco agua y cuidados y no compite con la cadena de suministro de alimentos. Esta planta posee un potencial productivo alto de más de 10 millones de hectáreas, de acuerdo a datos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (SAGARPA, 2017). De igual manera, *Jatropha curcas* presenta un alto contenido de

triglicéridos, lo cual permite la hidrogenación en un solo paso para conseguir combustible de manera más eficiente (Du et al., 2019; Alherbawi et al., 2021).

Si bien las materias primas para la producción de combustible de aviación son importantes, de igual manera lo son los procesos de producción. Dependiendo la naturaleza de la materia prima (triglicéridos, azúcares, almidones o lignocelulosa) se han propuesto diferentes procesos de conversión. Sin embargo, no es suficiente que el proceso sea factible desde el punto de vista técnico, debe asegurar que no genere un impacto negativo al medio ambiente.

2.5.2. Procesos de producción de bioturbosina

Los procesos de producción de bioturbosina certificados por la ASTM se muestran en la Tabla 3. De todas las rutas certificadas, el hidroprocesamiento es una de las tecnologías más maduras y con mayores rendimientos. El hidroprocesamiento de ácidos grasos y sus ésteres fue certificado en el 2011; este proceso, consiste en la conversión de triglicéridos a través de hidroxigenación, hidroisomerización e hidrocrackeo para producir biocombustible renovable de aviación (Gutiérrez-Antonio et al., 2017). Los biocombustibles HEFA son libres de compuestos aromáticos y azufre, presentan alta estabilidad térmica, son estables para su almacenamiento y resistentes al crecimiento de microbacterias (Yilmaz y Atmanli, 2017). Un aspecto importante del SAF es que no se necesita modificar el motor de la aeronave para su uso. A diferencia del resto de las rutas de procesamiento, HEFA es la única que cuenta con la madurez tecnológica para ser comercializada (Deane et al., 2017).

Tabla 3 Rutas de procesamiento certificadas de biocombustible de aviación

Ruta de procesamiento	Descripción	Materia Prima	Referencia
Queroseno Sintético Tropsch Parafínico Fischer-	Produce biocombustible de hidrocarburos a través de conversión catalítica de gas síntesis o "syngas"	Residuos agrícolas y forestales; Materias no renovables (carbón o gas natural)	Wang et al. (2016); Deane, Gallachóir, y Shea (2017)

Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados (HEFA)	Conversión química de materia prima de triglicéridos a través de hidroxigenación, hidroisomerización e hidrocrqueo para producir biocombustible	El aceite de <i>Jatropha curcas</i> , Camelina y algas	Gutiérrez-Antonio et al. (2017); Yilmaz y Atmanli (2017)
Iso-Parafinas Sintéticas	Formada por dos procesos para la producción de biocombustible: mejoramiento catalítico de azúcares y fermentación de azúcares a hidrocarburos. Las principales fuentes de materia prima para la fermentación de azúcares son la gran variedad de azúcares y derivados de la azúcar, como la sacarosa de la caña de azúcar o remolacha	Caña de azúcar; Remolacha	Instituto Mexicano del Petróleo (2016)
Queroseno Parafínico Sintético más Aromáticos	Utiliza el proceso de "syngas" más la adición de compuestos aromáticos derivados de la alquilación para crear una mezcla de hidrocarburos	Residuos agrícolas y forestales; Materias no renovables (carbón o gas natural)	Instituto Mexicano del Petróleo (2016)
Queroseno derivado de Alcohol	Transforma el alcohol derivado de la fermentación de azúcares en un biocombustible mediante su deshidratación, oligomerización e hidrogenación	Maíz; caña; biomasa celulósica	Yilmaz y Atmanli (2017); Asmelash, Boshell, y Castellanos (2020)
Queroseno producido por Hidrotermólisis Catalítica	Produce biocombustible a partir de ácidos grasos a través de un proceso hidrotérmico creando la mezcla de hidrocarburos	Aceite de soya; <i>Jatropha curcas</i> y Camelina	Holladay, Zia, y Heyne (2020)
Hidrocarburos-Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados	Los ácidos grasos se hidroprocesan para saturar las moléculas de hidrocarburo y eliminar todo el oxígeno	Alga <i>Botryococcus braunii</i>	Holladay et al. (2020)

2.5.3. Intensificación de procesos

La Intensificación de procesos se define como el conjunto de principios que, aplicados hacia un proceso o equipo determinado, brindan mejoras en eficiencia, tiempo y calidad, además de que ofrecen menor consumo de energía y gastos de operación (Dimian, Bildea, y Kiss 2014). En los procesos de producción de biocombustibles de aviación se esperan las siguientes mejoras (Gutiérrez-Antonio et al., 2021):

1. Alta innovación en comparación del proceso o equipo actual,
2. Debe proporcionar mejoras específicas,

3. Reducir el espacio del proceso y/o equipo, y en algunos casos la energía asociada con la operación,
4. El proceso intensificado puede realizar múltiples tareas en un equipo.

2.5.4. Integración de energética procesos

La integración energética de procesos es un enfoque global y sistemático que analiza el consumo energético de una planta o proceso en su conjunto, en lugar de considerar únicamente cada equipo o sistema energético de forma independiente. Tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia general de la energía, así como reducir su consumo de los procesos. Esta estrategia permite emplear la energía ya disponible en el proceso, para así reducir los requerimientos de energía externos. Por ello es posible disminuir tanto el costo de servicios auxiliares como las emisiones de dióxido de carbono (O'Malley et al., 2016).

Para realizar la integración energética de un proceso se pueden emplear diversas herramientas, siendo una de las más aplicadas la metodología del punto de pliegue.

El punto de pliegue es una metodología de la integración energética que tiene como propósito encontrar las cantidades óptimas de los insumos de entrada en un sistema para satisfacer las necesidades generales del proceso (Su et al., 2020). Esta metodología consiste en analizar los flujos de calor del proceso, minimizando los requerimientos externos de servicios de calentamiento y enfriamiento, utilizando el calor residual de las corrientes de proceso; a partir de ello es posible identificar las ineficiencias del sistema para después implantar las mejoras del proceso en términos de intercambios energéticos (Demirel, 2021).

2.5.5. Estándar RSB-STD-12-001

El estándar RSB-STD-12-001 define los requisitos del SAF para su producción y uso de acuerdo con el Esquema de Reducción y Eliminación de Carbono de la

Aviación Internacional (COSIA por sus siglas en inglés). Dicho estándar tiene alcance global para manufactureros que procesan o comercian bioturbosina. El SAF deberá demostrar, en su análisis de ciclo de vida, una reducción de CO₂ de por lo menos un 10 % comparado con el análisis de ciclo de vida del combustible de aviación estándar. El biocombustible de aviación, en su ACV, deberá incluir las emisiones producidas durante cada etapa de procesamiento:

1. Cultivo de la materia prima.
2. Acondicionamiento de la materia prima, por ejemplo, la recolección de la materia prima.
3. Extracción de la biomasa.
4. Traspotación hacia las instalaciones de producción del combustible.
5. Proceso de conversión de la materia prima en combustible.
6. Traspotación y distribución del combustible.
7. Uso del combustible: se consideran las emisiones del CO₂ no biogénico.

Para las etapas anteriores las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) de CH₄, N₂O y CO₂ no biogénico procedentes de estas actividades se calcularán sobre la base de un potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) de 100 años. La unidad funcional de ACV debe ser representada en gramos de CO_{2e} por mega joule (g CO_{2e}/MJ). El uso de esta unidad permite una comparación coherente y equitativa de las emisiones de CO₂ de diferentes combustibles o sistemas energéticos, independientemente de su contenido energético, eficiencia de combustión o rendimiento del vehículo (Q. Li et al., 2017).

2.5.6. Análisis de ciclo de vida

Se define como Análisis de Ciclo de vida al conjunto de metodologías usadas para analizar y evaluar el desempeño ambiental, así como el consumo de energía de todo el ciclo de vida de un producto. El ACV se evalúa a partir de la extracción de la materia prima, transporte procesamiento de materiales, fabricación y disposición final (Ludin et al., 2018).

La estandarización de la metodología del ACV se describe en la ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006; dicha metodología está conformada por 4 fases principales: a) la definición del objetivo y alcance, b) el inventario del análisis de ciclo de vida, c) la evaluación de impacto ambiental, y, por último, d) la interpretación de resultados.

La primera fase consiste en la exposición de motivos por los cuales el estudio debe llevarse a cabo, así como el alcance de éste, incluyendo su amplitud y profundidad. En la segunda fase se identifican y cuantifican los datos de entradas y salidas del sistema que generan un impacto durante el ciclo de vida de un producto. La tercera fase consiste en relacionar las entradas y salidas identificadas en la fase dos, con los posibles impactos en el medio ambiente, la salud humana y los recursos, para así comprender y jerarquizar mejor su impacto ambiental. Por último, en la cuarta fase se resumen y discuten los resultados del ACV para presentar recomendaciones y tomar decisiones (Palomares-Rodríguez et al., 2017).

La metodología ACV proporciona diferentes enfoques para evaluar el impacto ambiental según se requiera:

- De la “cuna a la tumba”: toma en cuenta la huella ambiental empezando por la extracción de la materia prima, trasportación, procesamiento de los materiales, manufactura, distribución, uso y disposición final.
- De la “cuna a la puerta”: abarca el proceso de extracción de la materia prima hasta la manufactura para evaluar su impacto ambiental. No toma en cuenta el uso y disposición del producto.
- De la “puerta a la puerta”: se refiere al análisis para sólo una parte del proceso.
- Del “pozo a la rueda”: considera las mismas etapas del análisis de la ‘cuna a la tumba’, y además incluye las emisiones hechas por los medios de transporte utilizados.

Las emisiones y recursos consumidos en un proceso específico se documentan en un análisis de ciclo de vida. Un análisis de impacto, el cual es la interpretación del impacto de los resultados con un enfoque ambiental, es elaborado evaluando la

salud humana, el medio ambiente y los problemas con la materia prima (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010).

Cabe añadir que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), junto con el laboratorio nacional Argonne, en el 2015 desarrollaron el software llamado “Gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y consumo de energía en el transporte” o GREET por sus siglas en inglés. GREET proporciona una plataforma que permite evaluar los efectos energéticos y medioambientales de las tecnologías de los vehículos y sistemas de energía o producto a través de sus bases de datos. Dicho programa es un modelo utilizado para el estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero en los biocombustibles de aviación. GREET está estructurado para que sistemáticamente examine la energía liberada en un análisis de ciclo de vida y las emisiones asociadas con los biocombustibles, sus rutas de procesamiento y la materia prima (Han et al., 2013).

Sin bien, el programa GREET puede calcular la energía total consumida del combustible, las emisiones contaminantes en el aire o las emisiones de CO₂ para un sistema, sigue siendo una herramienta para el análisis de ciclo de vida y no otorga una decisión final.

2.5.7. Diseño de experimentos

Un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado. El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso; esto se realiza por medio de pruebas planteadas adecuadamente para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionan evidencias objetivas que permiten responder las interrogantes planteadas. De esa manera, el

diseño de experimentos permite entender situaciones complejas de relación causa-efecto.

Uno de los problemas que es posible resolver por medio de diseño de experimentos es la comparación de dos o más factores de entrada, como variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden controlar; éstos se someten a cambios estratégicos para provocar cambios en la (s) variable (s) de respuesta, lo cual se conoce como efecto, y, con base en los resultados, se determina cual es el que mejor cumple mejor con los requerimientos. Adicionalmente existen factores no controlables o de ruido, que son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso.

Para el análisis de los resultados experimentales se debe recurrir a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos muestrales (experimentales) son lo suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales (o a nivel proceso); así, se pueda generar conocimiento y aprendizaje lo más eficiente posible (Gutiérrez, 2008).

3. Planteamiento del problema

El sector de la aviación enfrenta el mayor reto en su historia: su recuperación sostenible. En este contexto, es necesario contar con un biocombustible que posibilite alcanzar dicho objetivo. La bioturbosina debe satisfacer las propiedades fisicoquímicas establecidas en el estándar ASTM D7566; no obstante, también es necesario que los procesos de producción puedan cumplir con el estándar RSB-STD-12-001 (RSB 2021).

Un aspecto de vital importancia se refiere a las emisiones contaminantes líquidas o sólidas, así como de gases de efecto invernadero. Actualmente, los procesos certificados por la ASTM son convencionales; es decir, constan de equipos en los cuales se lleva a cabo sólo una operación unitaria a la vez. Estos procesos tienen

bajas eficiencias termodinámicas. A fin de reducir los costos tanto de capital como de operación se han propuesto procesos intensificados y/o integrados energéticamente. Sin embargo, dado que este tipo de procesos requieren equipo adicional o equipo con características especiales de producción se desconoce si en el ciclo de vida completo siguen siendo una opción que permita generar de manera sustentable el biocombustible de aviación; en particular, se busca que permitan reducir en mayor medida las emisiones de los combustibles ya certificados. Así, el problema que se aborda en el presente proyecto es precisar el cumplimiento del estándar RSB-STD-12-001 de nuevos procesos de producción de combustible renovable de aviación a partir de *J. Curcas*, mediante el modelado y análisis del ACV mediante el uso del software GREET.

4. Justificación

En el sector de la aviación, la bioturbosina es una de las alternativas más promisorias para lograr su recuperación sostenible. Actualmente, se han desarrollado y certificado rutas de procesamiento para la producción del biocombustible de aviación con base en biomásas, como grasas animales, aceites vegetales y algas (Demirbas, 2008). En los procesos convencionales certificados se ha determinado que el queroseno parafínico sintético produce menos emisiones de CO₂ que el combustible derivado del petróleo (Gutiérrez-Antonio et al., 2017).

En aras de reducir los costos de producción de este biocombustible se han utilizado estrategias de intensificación de procesos para mejorar el rendimiento del biocombustible (Ludin et al., 2018), así como de integración energética (Gutiérrez-Antonio et al. 2021). Los estudios muestran que es posible reducir los costos de operación y de capital; no obstante, el análisis del ciclo de vida completo de estos procesos permanece como un área de oportunidad. Como materia prima para la conversión por el proceso HEFA destaca la *J. Curcas* por su alto contenido de

triglicéridos; además, ésta no es una planta comestible y puede cultivarse en tierras marginales (Du et al., 2019).

Por su parte, el ACV es la metodología utilizada para evaluar el impacto ambiental de los procesos de producción de biocombustibles; de modo que sea determinado el nivel de confianza de la ruta de producción en términos de la sustentabilidad (Guinée et al., 2011). De igual manera, el ACV permite evaluar si un biocombustible obtenido mediante un nuevo proceso logra reducir en mayor medida las emisiones indicadas en el estándar RSB-STD-12-001; siendo este último uno de los requisitos para la comercialización del biocombustible de aviación.

5. Hipótesis

Los biocombustibles de aviación obtenidos a partir de *J. Curcas* mediante la tecnología HEFA integrada e intensificada presentan una reducción de CO₂ de por lo menos un 10 % comparado con el análisis de ciclo de vida del combustible de aviación fósil, por lo cual satisfacen el estándar RSB-STD-12-001 y son elegibles para CORSIA.

6. Objetivos

6.1. Objetivo General

Evaluar el cumplimiento del estándar RSB-STD-12-001 de nuevos procesos intensificados e integrados del proceso de hidrotreatmento para producción de biocombustibles de aviación utilizando *Jatropha curcas* mediante el uso del software GREET.

6.2. Objetivos específicos

- Analizar los nuevos procesos de producción de biocombustible de aviación considerando variables claves tales como conversión, rendimiento y consumo de energía, mediante el software Aspen Plus.
- Determinar el análisis de ciclo de vida para las rutas de procesamiento convencionales, intensificadas e integradas mediante el modelado y análisis de éstos en el software GREET.
- Diseñar un experimento numérico para determinar el efecto del volumen máximo de biocombustible que permita minimizar las emisiones establecidas en el estándar RSB-STD-12-001.
- Analizar los resultados obtenidos para identificar oportunidades de mejora en los procesos de producción de combustible renovable de aviación, y establecer la documentación de la ruta de producción que debe considerarse en los procesos de calidad.

7. Materiales y métodos

La metodología aplicada para el presente proyecto se encuentra abreviada en la Figura 1. Dicha metodología consiste en 5 secciones: 1. selección de procesos de producción de biocombustibles, 2. determinación del objetivo y alcance del ACV, así como la unidad funcional. Posteriormente, se procede al número 3, la generación del inventario a partir de la unidad funcional y los procesos de producción; luego se presenta el paso 4, el cálculo de emisiones a partir del RSB-STD-12-001. Por último, en el número 5, se presentan el análisis e interpretación de resultados.

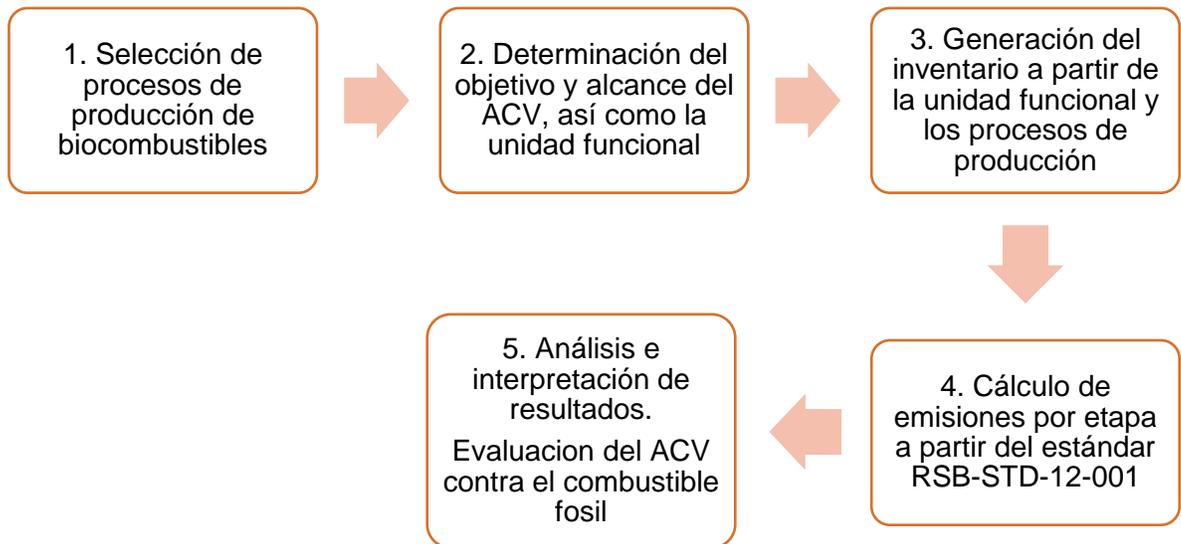


Figura 1 Metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.

Los materiales que se consideraron para esta investigación son equipo de cómputo, conexión a internet, y paquete de Microsoft Office. Además, se utilizó el software de libre acceso, GREET.

7.1. Selección de procesos de producción de biocombustible de aviación

La identificación y selección de los procesos de producción de biocombustibles de aviación es vital para este proyecto, ya que establece los fundamentos del estudio y el análisis de ciclo de vida. Así, se seleccionaron procesos dentro de la ruta del hidroprocesamiento, considerando tanto aquellos convencionales como los intensificados e integrados. La tecnología de hidroprocesamiento se selecciona, ya presenta mayor madurez de investigación y tecnológica, estando además certificada para uso comercial.

Se seleccionó la materia prima *J.Curcas* debido a ser considerada una de las principales materias primas a emplear en la ruta HEFA para la producción de

biocombustible de aviación. Este cultivo no es apta para consumo humano y contiene un elevado contenido de triglicéridos. En México se identifica un considerable potencial productivo (SAGARPA, 2017).

7.2. Determinación del objetivo y alcance del ACV, así como la unidad funcional

Con base a los procesos seleccionados, se determinó el objetivo y alcance del ACV para el procesamiento de biocombustible de aviación. Además, se dividió y definió cada etapa a evaluar como lo marca el estándar RSB-STD-12-001. Asimismo, se estableció la unidad funcional para representar los resultados de cada etapa del análisis.

7.3. Generación del inventario a partir de la unidad funcional y los procesos de producción

A partir de las etapas de cada proceso, se realizó un análisis de las variables que indica el estándar, como emisiones de CO₂ de la producción de la materia prima, emisiones anuales del uso de fertilizantes, y emisiones anuales del consumo de electricidad. Se realizó el registro de los datos del hidropocesamiento en una hoja de cálculo.

La información recabada fue procesada en el software GREET para realizar simulaciones de energía y emisiones de gases, además de obtener un panorama real y completo de todo el ciclo de procesamiento.

7.4. Cálculo de emisiones por etapa a partir del estándar RSB-STD-12-001

De acuerdo con lo definido en el estándar RSB-STD-12-001, se calcularon las emisiones por cada etapa de los procesos de producción de combustible sustentable de aviación. Estas etapas son:

1. Cultivo de la materia prima.

2. Acondicionamiento de la materia prima, por ejemplo, la recolección de la materia prima.
3. Extracción de la biomasa.
4. Traspotación hacia las instalaciones de producción del combustible.
5. Proceso de conversión de la materia prima en combustible.
6. Traspotación y distribución del combustible.
7. Uso del combustible

7.5. Análisis de Resultados e interpretación de resultados

En esta etapa se presentan los resultados de los procesos seleccionados, tomando como base el proceso convencional de producción de turbosina fósil. Las emisiones que fueron consideradas incluyen dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre. De igual manera, se comparó el resultado final de emisiones de cada proceso con las emisiones del combustible de aviación fósil, determinando si cumplen o no con lo requerido por estándar RSB-STD-12-001.

8. Resultados y discusión

En esta sección se presenta los resultados de la metodología descrita anteriormente, así como cualquier aspecto relevante encontrado durante la realización de este proyecto.

8.1. Hidroprocesamiento

El hidroprocesamiento o HEFA fue el proceso seleccionado, ya que es la tecnología más avanzada en términos de investigación y desarrollo tecnológico con respecto

al resto de las rutas de conversión a biocombustible. Dicha ruta esta certificada por la ASTM desde 2011 y el combustible proveniente de este proceso puede ser mezclado hasta con 50 % combustible fósil. El hidroprocesamiento es la única tecnología completamente comercial, siendo empleada por compañías tales como UOP Honeywell, Neste, Haldor y Axen (IRENA, 2017).

El proceso HEFA transforma los aceites naturales de lípidos a hidrocarburos, tratando el aceite con hidrógeno para eliminar el oxígeno; después los hidrocarburos se craquean e isomerizan, estableciendo el corte de bioturbosina. Este SAF está libre de aromáticos y azufre, reduciendo las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos volátiles (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx) (Kandaramath, 2014; Gutiérrez-Antonio, 2021,).

Siguiendo la metodología de mejora continua, los esfuerzos se han centrado en mejorar el consumo energético de la ruta HEFA utilizando el método de Intensificación de Procesos (IP). La IP se define como el conjunto de principios que, aplicados a un determinado proceso o equipo, proporcionan mejoras en eficiencia, tiempo y calidad; además de ofrecer un menor consumo energético, también se han observado mayores rendimientos. Las propuestas de IP han sido implementadas en la ruta HEFA; donde se ha obtenido un ahorro de energía en comparación con el proceso convencional (Dimian 2014). Por otra parte, la integración de energía ha sido aplicada también a la ruta de hidroprocesamiento para obtener mejores rendimientos. Esta herramienta permite analizar los procesos de una manera sistemática, utilizando la primera y segunda ley de la termodinámica (Claudia Gutiérrez-Antonio et al., 2016).

Ahora bien, la *J. Curcas* es una planta no comestible con alto contenido de triglicéridos, y sus semillas contienen entre 35 % y 40 % en peso de aceite; por ello, *Jatropha* es una de las principales materias primas a ser utilizadas por la ruta HEFA para el biocombustible de aviación. En México, *J. Curcas* se encuentra con alto potencial productivo en los estados de Chiapas, Guerrero, Hidalgo, Puebla, entre otros.

En este contexto, de acuerdo con Romero-Izquierdo (2015) han sido reportados, a nivel de modelado y simulación, tres procesos de producción usando hidroprocesamiento y como materia prima la *J. Curcas*: 1) proceso convencional, 2) proceso integrado y 3) proceso intensificado. Estos procesos son evaluados en términos de la metodología de ACV, analizándolos en seguida mediante el estándar RSB ---. Es importante señalar que las etapas de cultivo, traslado de la materia prima, y traslado hacia aeropuertos fueron considerados para el ACV, sin embargo, estas etapas no habían sido previamente estudiadas.

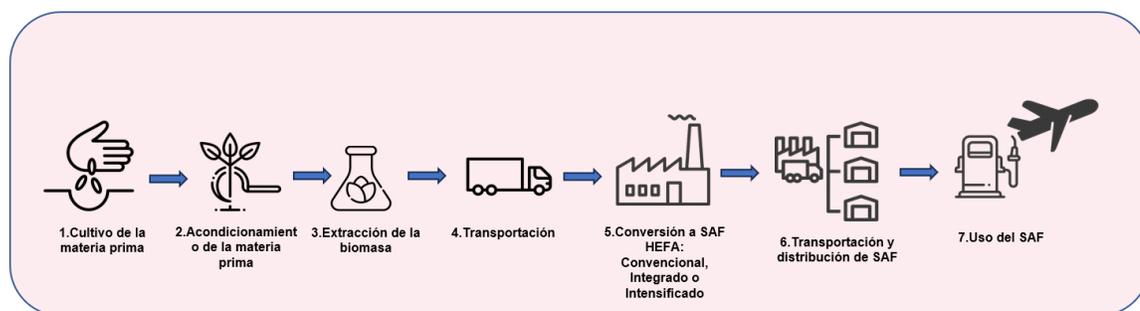
8.2. Objetivo y alcance del análisis de ciclo de vida

De acuerdo con la metodología descrita para el ACV es necesario definir el objetivo y alcance del estudio. Para el objetivo de este análisis, se definió la cantidad de CO₂ emitido en las etapas de producción de biocombustible producido a partir de *Jatropha Curcas*, en los procesos previamente mencionados: 1) proceso convencional, 2) intensificado, 3) integrado. Además, se definió como unidad funcional para este trabajo gramos de CO₂e por mega Joule (g CO₂e/MJ), tal como lo indica el estándar RSB-STD-12-001 (RSB, 2021).

Para cumplir con los requerimientos del estándar mencionado anteriormente, el alcance de este ACV fue de la cuna a la tumba, el cual considera las emisiones desde la etapa del cultivo de la materia prima hasta el uso final del combustible; además, se consideran las emisiones del transporte utilizado para mover la materia y/o combustible. En la Figura 2 se muestran las etapas para este estudio. Debido a que la única diferencia de los análisis radica en el tipo de proceso utilizado, se determinó que todas las etapas serían las mismas a excepción de la conversión a biocombustible.

En la siguiente sección se muestran los límites de cada etapa, así como cada fase según aplique.

Figura 2 Alcance del análisis de ciclo de vida



8.3. Inventario

Para el desarrollo de inventario y el resto del ACV se definió un caso de estudio, en el cual la materia prima es cultivada y procesada en la región Cuenca Mendoza del estado de Puebla. Esta región fue seleccionada porque cuenta con el 24 % de diversidad de los diferentes tipos de *Jatropha C.* de México; además, dicha región posee las condiciones climáticas óptimas para su cultivo y tiene un alto potencial de productivo (Rodríguez-Acosta et al., 2009) . Después de cosechar la materia prima, ésta se traslada a una planta de procesamiento para ser convertida a bioturbosina. Una vez convertido a SAF, el combustible es trasladado a el aeropuerto Internacional de la Ciudad de México para su uso final.

Para obtener los valores de emisiones de cada etapa del análisis se utilizó el software GREET. Dicho programa permite obtener la cantidad de las emisiones de un sistema o proceso. Se elige el producto que se quiere obtener, así como la unidad en que se desea presentar. Dicho programa arroja las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), óxido de nitrógeno (NO_x), partículas en el aire ($\text{PM}_{2.5}$), óxido sulfúrico (Sox), metano (CH_4), y óxido de nitrógeno (N_2O). En la Figura 3 se muestra la interfaz del programa.

Para el desarrollo de este trabajo, se obtuvo el valor energético de cada etapa como lo indica el estándar RSB-STD-12-001. El alcance de cada etapa se muestra a continuación. En la figura 3 se observa la interfaz del programa GREET, que

presenta la categoría del producto que se desea consultar, como gasolina, diésel o electricidad. Además, muestra las emisiones generadas por el uso del producto y el diagrama correspondiente al proceso de producción.

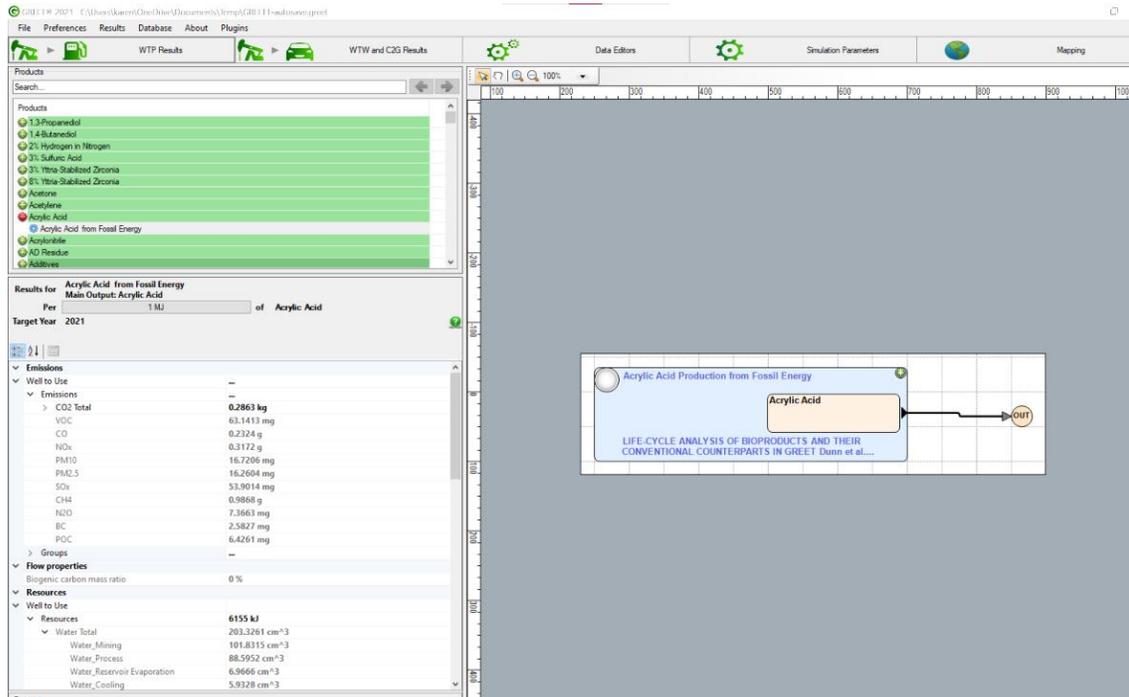


Figura 3 Impresión de pantalla del programa GREET.

8.3.1. Cultivo de la materia prima

Para el cultivo de la materia prima se definió que la *J. Curcas* sería sembrada en bolsas de polietileno; una vez pasado el tiempo de germinación, aproximadamente 8 semanas, se haría el trasplante definitivo; ahí se le aplicaría la cantidad adecuada de fertilizante y pesticidas. Esta etapa termina con la poda para remover la maleza y mantener la integridad de la planta (Góngora et al., 2018). En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo de la etapa.

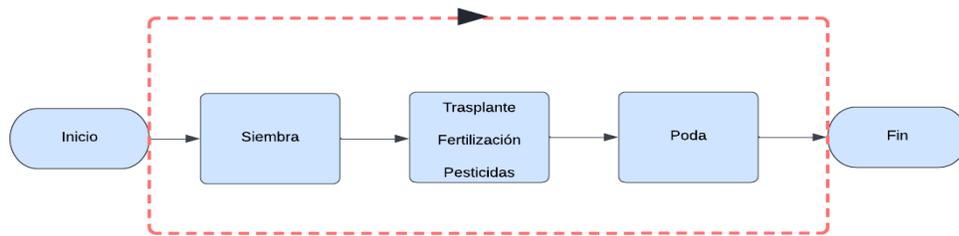


Figura 4 Cultivo de la materia prima

De acuerdo a la unidad funcional de gramos que indica el estándar RSB-STD-12-001, de CO₂e por mega Joule (g CO₂e/MJ) se obtuvieron los valores necesarios para determinar la cantidad de fertilizantes y pesticidas para esta etapa; lo anterior a partir del valor calorífico del SAF 43.1 MJ/kg y su densidad 795.5 kg/m³ (Hassan et al., 2023). De acuerdo con Romero-Izquierdo (2020), la conversión de la materia prima tiene una eficiencia al 80 %. En la Tabla 4 se muestran el valor en hectáreas (ha) de *J. Curcas*. requeridas para cumplir con la unidad funcional.

Tabla 4. Datos básicos sobre el biocombustible de aviación

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD	Referencia
Valor Calorífico SAF	43.1	MJ/Kg	(Chintakanan et al., 2021)
	0.023201856	kg	
Densidad SAF	795.5	kg/m ³	(Technologies Office, 2020)
Volumen SAF	0.00002917	m ³	
Volumen SAF (l)	0.029166381	l	
Aceite de <i>Jatropha C.</i> por ha	1650	L/Ha	

<i>Eficiencia de Jatropha C</i>	0.8	%	(Romero- Izquierdo, 2020)
<i>Litros de aceite de Jatropha C p/ SAF</i>	0.036457976	l	
<i>Ha de Jatropha C</i>	0.0000221	Ha	

Se eligió la marca de fertilizante Urea y de pesticida Acetochlor, por ser los más comunes. De acuerdo con las especificaciones del producto se obtuvo la cantidad necesaria para su uso dentro de la etapa. La Tabla 5 muestra la cantidad necesaria de fertilizante y pesticida por hectárea.

Tabla 5. Cantidades necesarias de fertilizantes y pesticidas

	Cantidad por ha (kg)	Cantidad necesaria de terreno a cultivar (Ha)
UREA	150	0.003314
ACETOCHLOR	200	0.004419

De la base de datos en GREET se obtuvieron los valores de emisiones del fertilizantes y pesticidas. Posteriormente, se calculó el valor de éstas por la cantidad requerida de estos por hectárea. Las Tablas 6 y 7 muestran el valor de las emisiones totales por utilizar fertilizantes y pesticidas.

Tabla 6. Emisiones por uso de fertilizantes para el cultivo de J. Curcas.

EMISIONES	VALOR	KILOGRAMOS	KG CO ₂ e / HA * YR
CO ₂	1038 g	0.003441964 kg	0.003441964
NO _x	2.4242 g	8.03468E-06 kg	0.002394333
PM2.5	0.2191 g	7.26177E-07 kg	1.258900223
SOX	1.0094 g	3.34552E-06 kg	0.076277776
CH ₄	5.3324 g	1.76735E-05 kg	0.0005
N ₂ O	39.1894 mg	1.29888E-07 kg	3.87066E-05
			Σ = 1.341553003

Tabla 7. Emisiones por uso de pesticidas para el cultivo de J. Curcas

EMISIONES	VALOR	KILOGRAMOS	KG CO ₂ e / HA * YR
CO ₂	20.6581 kg	0.091291215 kg	0.091291215
NO _x	25.3573 g	0.000112058 kg	0.033393188
PM2.5	2.0626 g	9.11494E-06 kg	1.258902795
SOX	21.9768 g	9.71187E-05 kg	2.214307409
CH ₄	35.8238 g	0.000158311 kg	0.004
N ₂ O	0.3935 g	1.73893E-06 kg	0.000518203
			Σ = 3.602412809

Para el proceso de poda, se definió el uso de una sierra manual que requiere energía eléctrica para su funcionamiento. Su requerimiento es de 0.06 kWh, asumiendo 8 horas para el proceso de poda. En la Tabla 8 se muestra la demanda total de requerimiento energético la sierra manual.

Tabla 8. Requerimientos energéticos de la sierra manual

Consumo de energía de la sierra manual (kWh)	Consumo total por 8 h de uso (kWh)
0.06	0.48

A partir de estos datos fueron estimadas las emisiones usando la base de datos de GREET. Las emisiones son mostradas en la Tabla 9.

Tabla 9. Emisiones de la poda.

EMISIONES	VALOR	UNIDAD	KILOGRAMOS	KG CO ₂ e / HA * YR
CO ₂	0.4604	kg	0.220992 kg	0.220992
NO _x	0.371	g	0.00017808 kg	0.05306784
PM2.5	30.2456	mg	1.45179E-05 kg	1.258904451
SOX	0.3279	g	0.000157392 kg	3.5885376
CH ₄	0.9159	g	0.000439632 kg	0
N ₂ O	9.5491	mg	4.58357E-06 kg	0.001365903
				Σ = 5.122867794

8.3.2. Acondicionamiento de la materia prima

El acondicionamiento de la materia prima se refiere al proceso de cosecha del fruto una vez que haya llegado a su madurez. Las operaciones involucradas en esta etapa se presentan en la Figura 5, considerándose una cosecha manual y el almacenamiento del fruto recolectado.

La cosecha manual se describe como cortar de manera manual el fruto maduro y colocarlo en canasto o bolsa. Una vez terminada esta actividad se procede a colar la cosecha en un costal para su almacenamiento (Góngora et al., 2018). Ya que este proceso es completamente manual se asume que la carga de emisiones es cero.

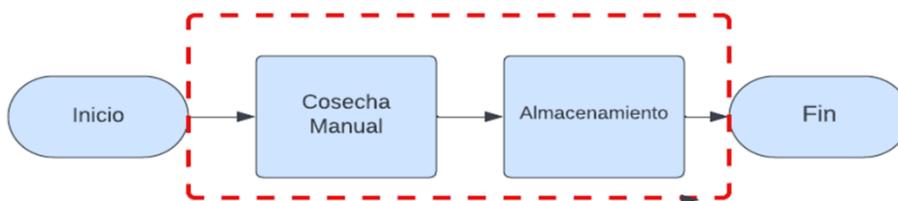


Figura 5 Acondicionamiento de la materia prima

8.3.3. Extracción y procesamiento de la biomasa

El proceso para extracción de aceite de la materia se encuentra mostrado en la Figura 6. Para esta etapa se utilizó el proceso desarrollado por Romero-Izquierdo (2020). Este esquema indica que el fruto de la *J. Curcas* pasa por dos procesos de descascarillado, el primero para remover la cascarilla exterior y el segundo para remover la cascarilla interna dejando la almendra. Después, el aceite es extraído por medio de un prensado mecánico, filtrado, y almacenado.



Figura 6 Extracción y procesamiento de la materia prima

Para el proceso de descascarillado 1 y 2 se utiliza una limpiadora y clasificadora de semillas estándar que requiere 1.4 kW para procesar 7500 kg/h de fruto con cáscara. Para el primer descascarillado se determina la cantidad de 0.23118 kg, de acuerdo al modelo de Romero-Izquierdo (2020) y la unidad funcional de este análisis; mientras que para el segundo descascarillado se determina la masa de entrada en 0.1456 kg que corresponde al 63 % de eficiencia del descascarillado total. La Tabla 10 muestra la relación de la masa de entrada por los kilowatts utilizados por el equipo.

Tabla 10. Datos de descascarillado de *Jatropha Curcas*

Masa de entrada (kg)	Consumo de energía (kW)
----------------------	-------------------------

Descascarillado 1	0.231218	4.31607E-05
Descascarillado 2	0.145667	2.71912E-05

Posteriormente se obtienen los valores correspondientes de las emisiones estimadas de la base de datos GREET.

Tabla 11. Emisiones del proceso de descascarillado 1 y 2.

Emisiones	Proceso de descascarillado 1 y 2			
	Descascarillado 1		Descascarillado 2	
	Valor	Total (kg)	Valor	Total (kg)
CO ₂	0.4604 kg	0.000019871 kg	0.4604 kg	0.000000001 kg
NO _x	0.371 g	0.000000016 kg	0.371 g	0.000000001 kg
PM _{2.5}	30.2456 mg	0.000001305 kg	30.2456 mg	0.000000009 kg
SO _x	0.3279 g	0.000000014 kg	0.3279 g	0.000000025 kg
CH ₄	0.9159 g	0.000000040 kg	0.9159 g	0.000000000 kg
N ₂ O	9.5491 mg	0.000000000 kg	9.5491 mg	0.000000000 kg

Para el prensado mecánico se utiliza una máquina que requiere 6 kW para procesar 30 kg de semilla sin cáscara. De acuerdo con el modelo de Romero-Izquierdo (2020), la masa de entrada se define a 0.08594 kg. La Tabla 12 muestra la demanda energética necesaria para completar el proceso. Asimismo, en la Tabla 13 se muestran las emisiones estimadas del prensado mecánico. Para el proceso de filtrado se determina que es un proceso manual, y no requiere maquinaria para ser completado, por lo que no produce emisiones considerables para este análisis.

Tabla 12. Datos del prensado mecánico.

Prensa Mecánica	Consumo de energía (kW)
Masa de entrada (kg)	
0.08594	0.0171888

Tabla 13. Emisiones generadas por el prensado mecánico.

EMISIONES	VALOR	KILOGRAMOS	TOTAL
CO ₂	0.4604 kg	0.460400000 kg	0.007913724
NO _x	0.371 g	0.000371000 kg	0.000006377
PM _{2.5}	30.2456 mg	0.000030246 kg	0.000000520
SO _x	0.3279 g	0.000327900 kg	0.000005636
CH ₄	0.9159 g	0.000915900 kg	0.000015743
N ₂ O	9.5491 mg	0.000009549 kg	0.000000164

8.3.4. Traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible

Esta etapa sucede después de la extracción del aceite de *J.Curcas* y antes del procesamiento a biocombustible. Aquí el aceite se traslada a una biorrefinería a 25 km de distancia de la zona de cultivo y la cosecha de la materia prima. El diagrama de flujo de este proceso se observa en la Figura 7.



Figura 7 Traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible.

El aceite de *J.Curcas*. es almacenado en contenedores de plástico, y puesto en un vehículo de carga que utiliza diésel convencional. El vehículo utiliza 25 L de combustible por cada 100 km recorridos, y de acuerdo con el rendimiento de este combustible se requieren 3.8 L de petróleo para obtener 1 L de diésel; por lo cual se calcula la cantidad de petróleo necesaria para recorrer 25 km. Los datos de combustible se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos para el transporte del aceite para la conversión a SAF.

	Valor	Unidad
--	-------	--------

Distancia del procesamiento a planta de procesamiento	25	Km
Rendimiento del petróleo para 1 l diésel	3.8	L
Cantidad de combustible p/100 km	25	L
Cantidad de combustible p/25 km	6.25	L
km por petróleo	23.75	Kg

En la Tabla 15 se presenta la estimación de las emisiones producidas por el combustible fósil para la producción y consumo de la base de datos de GREET.

Tabla 15. Emisiones por la producción y consumo de combustible.

Producción y consumo de combustible				
EMISIONES	Valor	Kilogramos	Producción	Consumo
CO ₂	0.1508 kg	0.1508 kg	3.5815 kg	3.5815 kg
NO _x	0.4833 g	0.000483300 kg	0.011478375 kg	3.42055575 kg
PM2.5	21.294 mg	0.000021294 kg	0.000505733 kg	1.259055058 kg
SOX	0.1331 g	0.000133100 kg	0.003161125 kg	72.07365 kg
CH ₄	3.5816 g	0.003581600 kg	0.085063kg	0.002 kg
N ₂ O	2.2596 mg	0.000002260 kg	5.36655E-05 kg	0.015992319 kg

8.3.5. Proceso de conversión de la materia prima en combustible

Esta etapa se refiere al procesamiento del aceite de *J. Curcas* para ser transformado a SAF. Como se definió anteriormente esta etapa, se tienen tres procesos para la conversión de SAF, el HEFA convencional, intensificado e integrado. En la Figura 8 se muestra el diagrama de flujo de esta etapa. Para la modelación del proceso se utilizaron los modelos y los resultados obtenidos por Romero – Izquierdo (2016), debido a que representan a detalle las variantes de cada tipo de proceso.



Figura 8 Proceso de conversión a biocombustible

Basado en el proceso de simulación para obtener la unidad funcional establecida al inicio de este análisis (MJ), la planta de procesamiento se dividió en tres categorías: los equipos eléctricos, térmicos y de refrigeración. En seguida se obtuvo la potencia eléctrica de cada uno de éstos, mostrados en la Tabla 16. En dicha tabla se observa que algunos valores presentan un signo negativo (-), esto indica que en algunos equipos se recupera energía de la planta de procesamiento.

Tabla 16 Requerimientos eléctricos para HEFA Convencional

Tipo de equipo	Nombre	kW para 1 MJ
Eléctrico	C1	0.000228036
	B1-Oil	0.000342069
	Turbina	-0.000439751
Térmico	E1	0.003617082
	E2	0.0019404
	CHAQ-R2	-0.001691235
	B13	0.00050421
	B3	0.000029694
	B1	0.001418305
Refrigeración	R-HCR-IS	-0.006057674
	E-3	0.000924067
	B-12	0.003809015
	MR1-DS (condensador)	-0.00033565
	MR2-DS (condensador)	-0.000386365

Tabla 17 Emisiones por HEFA convencional en kg.

		CO ₂	NO _x	PM2.5	SO _x	CH ₄	N ₂ O
Eléctrico	C1	0.000105	8.46E-08	6.9E-06	7.48E-08	2.09E-07	2.18E-09
	B1-Oil	1.78E-08	1.85E-08	1.12E-07	3.13E-07	3.27E-09	3.27E-09
	Turbina	-0.0002	-1.6E-07	-1.3E-08	-1.4E-07	-4E-07	-4.2E-09
Térmico	E1	0.001665	1.34E-06	1.09E-07	1.19E-06	3.31E-06	3.45E-08
	E2	0.000893	7.2E-07	5.87E-08	6.36E-07	1.78E-06	1.85E-08
	CHAQ-R2	-0.00078	-6.3E-07	-5.1E-08	-5.5E-07	-1.5E-06	-1.6E-08
	B13	0.000232	1.87E-07	1.53E-08	1.65E-07	4.62E-07	4.81E-09
	B3	1.37E-05	1.1E-08	8.98E-10	9.74E-09	2.72E-08	2.84E-10
	B1	0.000653	5.26E-07	4.29E-08	4.65E-07	1.3E-06	1.35E-08
Refrigeración	R-HCR-IS	-0.00279	-2.2E-06	-1.8E-07	-2E-06	-5.5E-06	-5.8E-08
	E-3	0.000425	3.43E-07	2.79E-08	3.03E-07	8.46E-07	8.82E-09
	B-12	0.001754	1.41E-06	1.15E-07	1.25E-06	3.49E-06	3.64E-08
	MR1-DS	-0.00015	-1.2E-07	-1E-08	-1.1E-07	-3.1E-07	-3.2E-09
	MR2-DS	-0.00018	-1.4E-07	-1.2E-08	-1.3E-07	-3.5E-07	-3.7E-09

De la misma manera se continuó con la potencia eléctrica para el HEFA intensificado e integrado junto con las emisiones producidas. En la Tabla 18 se muestra el requerimiento del proceso intensificado y en la Tabla 19 las emisiones producidas.

Tabla 18 Requerimientos eléctricos para HEFA intensificado

Tipo de equipo	Nombre	kW para 1 MJ
Eléctrico	C1	0.000228036
	B1-Oil	0.000342069
	Turbina	-0.000439751
Térmico	E1	0.003617082
	E2	0.0019404
	CHAQ-R2	-0.001691235
	B13	0.00050421
	B3	0.000029694
Refrigeración	B1	0.001418305
	R-HCR-IS	-0.006057674
	E-3	0.000924067
	B-12	0.003809015
	B9 CONDENSADOR	-0.00034986
	B9 REBOILER	0.002019192

Tabla 19 Emisiones por HEFA intensificado en kg

		CO ₂	NO _x	PM2.5	SO _x	CH ₄	N ₂ O
Eléctrico	C1	0.000105	8.46E-08	6.9E-06	7.48E-08	2.09E-07	2.18E-09
	B1-Oil	1.78E-08	1.85E-08	1.12E-07	3.13E-07	3.27E-09	3.27E-09
	Turbina	-0.0002	-1.6E-07	-1.3E-08	-1.4E-07	-4E-07	-4.2E-09
Térmico	E1	0.001665	1.34E-06	1.09E-07	1.19E-06	3.31E-06	3.45E-08
	E2	0.000893	7.2E-07	5.87E-08	6.36E-07	1.78E-06	1.85E-08
	CHAQ-R2	-0.00078	-6.3E-07	-5.1E-08	-5.5E-07	-1.5E-06	-1.6E-08
	B13	0.000232	1.87E-07	1.53E-08	1.65E-07	4.62E-07	4.81E-09
	B3	1.37E-05	1.1E-08	8.98E-10	9.74E-09	2.72E-08	2.84E-10
Refrigeración	B1	0.000653	5.26E-07	4.29E-08	4.65E-07	1.3E-06	1.35E-08
	R-HCR-IS	-0.00279	-2.2E-06	-1.8E-07	-2E-06	-5.5E-06	-5.8E-08
	E-3	0.000425	3.43E-07	2.79E-08	3.03E-07	8.46E-07	8.82E-09
	B-12	0.001754	1.41E-06	1.15E-07	1.25E-06	3.49E-06	3.64E-08
	B9	-	-	-	-	-	-
	CONDENSADO	0.00016107	1.29798	1.05817	1.14719	3.20437	3.34085
	R	6	E-07	E-08	E-07	E-07	E-09
B9 REBOILER	0.00092963	7.4912E-07	6.10717	6.62093	1.84938	1.92815	
	6	07	E-08	E-07	E-06	E-08	

Por último, se obtuvo el requerimiento eléctrico para el proceso de hidrotratamiento integrado y las emisiones producidas por éste. En la Tabla 20 se muestra el requerimiento eléctrico, y en la Tabla 21 las emisiones estimadas obtenidas por el software GREET.

Tabla 20 Requerimientos eléctricos para HEFA integrado.

Tipo de equipo	Nombre	kW para 1 MJ
Eléctrico	C1	0.000228036
	B1-Oil	0.000342069
	Turbina	-0.000439751
Térmico	E3	0.000924091
	B25	0.001843921
Refrigeración	B-12	0.000829786

Tabla 21 Emisiones por HEFA integrado en kg.

		CO ₂	NO _x	PM2.5	SO _x	CH ₄	N ₂ O
Eléctrico	C1	0.000105	8.46E-08	6.9E-06	7.48E-08	2.09E-07	2.18E-09
	B1-Oil	1.78E-08	1.85E-08	1.12E-07	3.13E-07	3.27E-09	3.27E-09
	Turbina	-0.0002	-1.6E-07	-1.3E-08	-1.4E-07	-4E-07	-4.2E-09
Térmico	E3	0.000425	3.43E-07	2.79E-08	3.03E-07	8.46E-07	8.82E-09
	B25	0.000849	6.84E-07	5.58E-08	6.05E-07	1.69E-06	1.76E-08
Refrigeración	B-12	0.000382	3.08E-07	2.51E-08	2.72E-07	7.6E-07	7.92E-09

8.3.6. Traslado y distribución del combustible

Esta etapa se refiere al traslado del biocombustible de la planta de procesamiento al centro de distribución y almacenamiento, antes de ser colocado en el avión. El proceso de esta etapa se presenta en la Figura 9. Después del procesamiento del SAF, éste es almacenado en contenedores aptos para materiales peligrosos y transportado en un camión de carga al aeropuerto internacional de la Ciudad de México; aquí es almacenado hasta que se traslada al avión. De la planta de procesamiento al centro de distribución se estima una distancia de 133 km más 2 km de traslados en el aeropuerto hasta el avión.

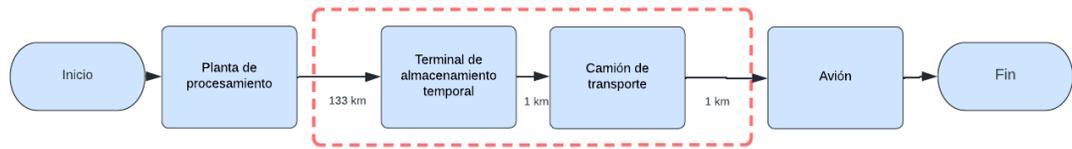


Figura 9 Traslado y distribución del combustible.

Similar al apartado 8.3.4 han sido definidas las emisiones por kilómetros recorridos de la planta de procesamiento a la terminal del aeropuerto de la Ciudad de México, los cuales son 135 km. Además del requerimiento eléctrico del equipo para el almacenamiento de combustible. En las Tablas 22 y 23 se muestran los datos para la conversión de combustible, así como las emisiones estimadas en la producción y consumo del combustible.

Tabla 22 Datos para conversión de combustible

	Valor	Unidad
<i>Distancia de la planta de procesamiento al centro de distribución</i>	135	km
<i>Rendimiento del petróleo para 1 l diésel</i>	3.8	l
<i>Cantidad de combustible p/135 km</i>	33.75	l
<i>km por petróleo</i>	128.25	kg

Tabla 23 Producción y consumo de combustible.

Emisiones	Valor	U	Kilogramos	U	Producción	Consumo
CO ₂	0.1508	kg	0.1508	kg	19.3401	19.3401
NO _x	0.4833	g	0.000483300	kg	0.061983225	0.061983225
PM _{2.5}	21.294	mg	0.000021294	kg	0.002730956	0.002730956
SO _x	0.1331	g	0.000133100	kg	0.017070075	0.017070075
CH ₄	3.5816	g	0.003581600	kg	0.459340200	0.4593402
N ₂ O	2.2596	mg	0.000002260	kg	0.000289794	0.000289794

Para el almacenamiento del SAF se considera un almacenamiento pasivo, ya que no requiere componentes eléctricos para su funcionamiento; sin embargo, se requiere una bomba eléctrica externa para mover el combustible de un contenedor

a otro. Se considera el uso de una bomba eléctrica para esto, la cual tiene un requerimiento eléctrico de 0.2 kW. En la Tabla 24 se muestran las emisiones estimadas por el uso de la bomba.

Tabla 24 Datos de la bomba eléctrica

Bomba (Electricidad)					
Emisiones	Valor	U	Kilogramos	U	Total
CO ₂	0.4604	kg	0.4604	kg	0.09208
NO _x	0.371	g	0.000371000	kg	0.0000742
PM _{2.5}	30.2456	mg	0.000030246	kg	6.04912E-06
SO _x	0.3279	g	0.000327900	kg	0.00006558
CH ₄	0.9159	g	0.000915900	kg	0.00018318
N ₂ O	9.5491	mg	0.000009549	kg	1.90982E-06

8.3.7. Uso del biocombustible

Para esta etapa se consideran únicamente las emisiones estimadas durante la quema del combustible. Este proceso se encuentra mostrado en la Figura 10.

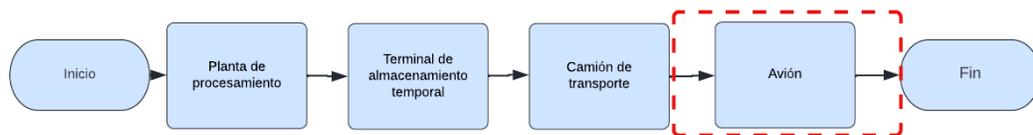


Figura 10 Uso del combustible

Para este caso de investigación, se extrajeron los datos sobre emisiones del estudio realizado por Sundararaj (2019), donde se analizaron los impactos de diversas mezclas de bioturbosina en el proceso de combustión, evaluando tanto las emisiones generadas como la eficiencia de conversión. En dicho trabajo, se combinaron distintas concentraciones de bioturbosina con turbosina convencional, seguido de pruebas en cámaras de combustión. El estudio proporcionó datos de emisiones para mezclas al 20 % y 70 % con respecto al combustible fósil base, los cuales se detallan en la Tabla 25.

Tabla 25 Emisiones producidas por la combustión de *Jatropha C.*

<i>Emisiones</i>	<i>Jatropha C. 20 %</i>	<i>Jatropha C. 70 %</i>
CO ₂	0.007 kg	0.018 kg
NO _x	0.006 kg	0.002 kg

En este trabajo se considera que la combustión del avión es a partir de la mezcla de *J. Curcas.* al 50 % en peso con turbosina convencional, debido a que es el nivel máximo permitido por ASTM; por lo cual se realiza una interpolación de los resultados del estudio de Sundararaj (2019) para estimar las emisiones correspondientes, las cuales se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26 Emisiones producidas por la combustión de *Jatropha C.* al 50 %

<i>Emisiones</i>	<i>Jatropha C. 50 %</i>
CO ₂	0.0136 kg
NO _x	0.0036 kg

8.4. Emisiones por etapa a partir del estándar RSB-STD-12-001

El estándar RSB-STD-12-001 indica que todas las emisiones deben ser presentadas en kilogramos de CO₂ por mega Joule (MJ) (kgCO₂e/MJ) para realizar su comparación con el combustible fósil, de manera que sean certificadas. Es por esto que todas las emisiones anteriormente obtenidas de las diferentes etapas se convierten a la unidad deseada. Para eso se realizó la conversión de las emisiones de acuerdo con la Tabla 27.

Tabla 27 Conversión de emisiones a kgCO₂

Emisiones	Conversión COe	Referencia
CO ₂	Equivalente	
NO _x	298 kg of COe	(EPA, 2022)
PM2.5	Y=0.3066 x + 1.2589	(Yang et al., 2016)
SO _x	22 800 kg of Coe	(Climate Change Connection)
CH ₄	25 kg of COe	(EPA, 2022)
N ₂ O	298 kg of COe	(EPA, 2022)

Una vez convertidas todas las emisiones a kgCO₂e/MJ se suman de manera lineal, y se procede a calcular las emisiones totales por etapa como lo indica el estándar. A continuación, se presentan el cálculo por cada una de las etapas.

8.4.1. Cultivo de la materia prima

El cálculo de las emisiones para el cultivo de la materia prima se muestra en la ecuación 1, la cual es obtenida del estándar RSB-STD-12-001 . Para este caso las emisiones por las semillas (e_{semillas}) se consideran nulas. La eficiencia del producto anual se presenta como 1,050.06 kg al año debido a la capacidad anual de florecer de la *Jatropha C*. Los valores de las emisiones producidas por los fertilizantes y pesticidas quedan definidos como 1.341553003 kg CO₂e / ha * yr y 3.602412809 kg CO₂e / ha * yr respectivamente (tablas 6 y 7).

$$e_{ec} = \frac{e_{\text{fertilizante}} + e_{\text{pesticidas}} + e_{\text{semillas}} + e_{\text{m.work}} + e_{\text{electricidad}} + e_{\text{N}_2\text{O}}}{y_i}$$

Ecuación 1

Donde:

e_{ec} = Emisiones GHG de la producción de la materia prima

$e_{\text{fertilizante}}$ = Emisiones anuales del uso de fertilizantes

e_{semillas} = Emisiones anuales del uso de pesticidas

$e_{tra.mecánico} = \text{Emisiones anuales del combustible usado en trabajo}$

$e_{electricidad} = \text{Emisiones anuales del consumo de electricidad}$

$e_{N_2O} = \text{Emisiones de } N_2O \text{ anuales}$

$y_i = \text{Eficiencia del producto anual}$

Para las emisiones del trabajo mecánico se presentan como 5.122867794 kg CO_{2e} / ha * yr; el valor final se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28 Emisiones del cultivo de la materia prima

Cultivo de la materia prima	
e_{ec}	0.009598186
$e_{fertilizante}$	1.341553003
$e_{pesticida}$	3.602412809
$e_{semillas}$	0
$e_{tra. Mecanico}$	0
$e_{electricidad}$	5.122867794
e_{N2O}	0.011837797
y_i	1050.06

kg CO_{2e} / ha * yr

8.4.2. Acondicionamiento de la materia prima

La ecuación para calcular las emisiones generadas por el procesamiento de la materia prima se expone en la ecuación 2. No obstante, como se indicó previamente, en esta fase solo se tiene en cuenta la labor manual, por lo que se supone que las emisiones asociadas son inexistentes.

$$e_p = \frac{e_{electricidad} + e_{calor} + e_{m.work} + e_{m.input} + e_{fugas}}{y_i}$$

Ecuación 2

Donde:

e_p = Emisiones GHG por el procesamiento de la materia prima

$e_{electricidad}$ = Emisiones anuales del uso de electricidad

e_{calor} = Emisiones anuales del uso de pesticidas

$e_{tra.mecánico.}$ = Emisiones anuales del combustible usado en trabajo

$e_{m.input}$ = Emisiones anuales por consumo de materiales

e_{fugas} = Emisiones de fuga anuales

y_i = Producción anual del producto

8.4.3. Extracción y procesamiento de la biomasa

Similar a la etapa de acondicionamiento de la materia prima, las emisiones para la extracción y procesamiento de la biomasa se calculan utilizando la ecuación 2. Para esta etapa se definió que no habrá fugas, además que las emisiones por consumo de materiales, calor y trabajo manual son cero. Utilizando los valores obtenidos en la sección 8.3.4 y realizando la conversión a Co_e , el resultado de esta etapa se encuentra en la Tabla 29.

Tabla 29 Emisiones por la extracción y procesamiento de la materia prima

Extracción y procesamiento de la biomasa	
e_{ec}	0.003729296
$e_{material}$	0
e_{calor}	0
$e_{tra. Mecanico}$	0
$e_{electricidad}$	3.915984868
e_{fugas}	0
y_i	1050.06

kg CO_{2e} / Ha * a

8.4.4. Traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible

El cálculo de las emisiones por el traslado hacia las instalaciones de procesamiento se presenta en la ecuación 3. Para esta etapa se definió que no hay pérdidas por

ser una estimación del proceso real y que las emisiones por almacenamiento son nulas. El resultado de esta etapa se presenta en la Tabla 30.

$$e_{td} = \frac{e_{transporte}}{product\ i} + \frac{e_{almacenamiento}}{product\ i}$$

Ecuación 3

Donde:

e_{td} = Emisiones GHG por el transporte y distribución del producto

$e_{electricidad}$ = Emisiones anuales por el transporte

$e_{producto\ i}$ = Cantidad del producto i , considerando pérdidas

Tabla 30 Emisiones por el traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible

Traslado hacia las instalaciones de procesamiento de combustible		
e_{td}	6.766547632	kg CO ₂ e / Ha * a
$e_{transporte}$	160.7055063	
$e_{almacenamiento}$	0	
$e_{producto\ i}$	23.75	

8.4.5. Proceso de conversión de la materia prima en combustible

El cálculo de las emisiones para el proceso de conversión a SAF se utiliza la ecuación 2. Para esta etapa se calculan las emisiones para cada variante de proceso. Se define que las emisiones por calor, trabajo mecánico y fugas son cero. Los resultados se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31 Emisiones producidas por la conversión a SAF

Proceso de conversión HEFA convencional		
e_p	0.015617844	kg CO _{2e} / a
$e_{electricidad}$	16.39967298	
e_{calor}	0	
$e_{tra. mecánico}$	0	
$e_{material}$	0	
e_{fugas}	0	
Proceso de conversión HEFA Intensificado		
e_p	0.015636176	kg CO _{2e} / a
$e_{electricidad}$	16.41892316	
e_{calor}	0	
$e_{tra. mecánico}$	0	
$e_{material}$	0	
e_{fugas}	0	
Proceso de conversión HEFA Integrado		
e_p	0.006025438	kg CO _{2e} / a
$e_{electricidad}$	6.327071882	
e_{calor}	0	
$e_{tra. mecánico}$	0	
$e_{material}$	0	
e_{fugas}	0	

8.4.6. Traslado y distribución del combustible

Las emisiones producidas por esta etapa se calculan utilizando la ecuación 3. Al igual que la etapa de 4 se asume que no hay pérdidas, por ser una simulación ideal. Sin embargo, para esta etapa si se consideran las emisiones producidas por el almacenamiento. El resultado de esta etapa se encuentra en la Tabla 32.

Tabla 32 Emisiones por el traslado y distribución

Traslado y distribución del combustible		
e_{td}	6.702570763	kg CO _{2e} / kgi
$e_{transporte}$	856.7358138	kg CO _{2e} / ha * yr
$e_{almacenamiento}$	2.868886581	kg CO _{2e} / ha * yr
$product_i$	128.25	kgi / ha * yr

8.4.7. Uso del combustible

De acuerdo al estándar, las emisiones de esta etapa se pueden obtener de investigaciones relevantes o casos de estudios ya realizados. En este caso particular, se utilizaron los datos de la investigación de Sundararaj (2019) y se ajustaron para la combustión de *Jatropha C* al 50 %, las cuales están presentadas en la Tabla 26. Además, la misma referencia indica que las emisiones pueden ser usadas directamente para el análisis de ciclo de vida. Al igual que el resto de las etapas se convirtieron las emisiones a CO_{2e}, éstas se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33 Emisiones por uso del combustible

Emisiones	<i>Jatropha C. 50 %</i>	kg CO _{2e}
CO ₂	0.0136 kg	0.0136
NOx	0.0036 kg	1.0728
	Total	1.0864

De esta manera se obtienen las emisiones como lo marca el estándar RSB-STD-12-001 para la conversión de *Jatropha Curcas* por medio de hidrotratamiento convencional, intensificado e integrado. Los resultados se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34 Emisiones totales de la conversión de *J. Curcas*

	HEFA convencional	HEFA intensificado	HEFA integrado
Cultivo de la materia prima	0.009598186	0.009598186	0.009598186
Acondicionamiento de la materia prima	0	0	0

<i>Extracción de la biomasa</i>	0.003729296	0.003729296	0.003729296
<i>Transportación</i>	6.766547632	6.766547632	6.766547632
<i>Proceso de conversión</i>	0.015617844	0.015636176	0.008424457
<i>Transportación y distribución</i>	6.702570763	6.702570763	6.702570763
<i>Uso del combustible</i>	1.0864	1.0864	1.0864
<i>Total</i>	14.58446372	14.58448205	14.57727033

En la Tabla 34 se muestran las emisiones totales y de cada etapa de la producción de SAF por medio del proceso HEFA convencional, intensificado e integrado, las cuales fueron para el total de su ciclo de vida de 14.544, 14.584 y 14.57 gCo_{2e} / MJ respectivamente.

Esto corresponde a una reducción del 84 % de emisiones con respecto a su contra parte fósil (Jet-A1) de 89 gCo_{2e} / MJ. Este resultado confirma que los procesos de producción de combustible renovable de aviación sí reducen la cantidad de emisiones negativas liberadas a la atmósfera.

Cuando se realizó el análisis de cada etapa, se observó que el principal factor que contribuye a las emisiones totales fueron las operaciones de transportación y distribución, con un 45 % para los tres procesos de conversión de SAF, HEFA convencional, intensificado e integrado; esto puede deberse a los requerimientos necesarios para transportar y distribuir el combustible a través de un aeropuerto de gran tamaño, tal como el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Se considero este aeropuerto por ser el más importante del país. Esto resalta la importancia de considerar cadenas de suministro locales, que permitan reducir este impacto.

De manera contraria, la etapa que presentó menor impacto fue el acondicionamiento de la materia prima, ya que desde el inicio se definió que esta etapa sería manual;

por lo tanto, no necesitaría algún tipo de mecanismo que pudiera producir emisiones contaminantes. Cabe mencionar que para este análisis se consideró un valor bajo de *Jatropha C.* por lo cual en el futuro se recomienda evaluar esta etapa con un flujo industrial (.5 toneladas al año) para evaluar su impacto ambiental.

También con un considerable menor impacto están las etapas de extracción de la biomasa y proceso de conversión con un 2 % total de todas las emisiones. Para el escenario del HEFA integrado se identifica mejora del .15 % con respecto a los otros dos procesos en el proceso de conversión a bioturbosina.

En la Figura 11 se muestra la comparación gráfica entre cada uno de los escenarios evaluados mediante análisis de ciclo de vida. Se puede observar que los tres escenarios son sumamente similares, presentando ligeras diferencias en la zona de procesamiento de la materia prima a bioturbosina. Sin embargo, todos los escenarios presentan una disminución del 84 % con respecto al combustible de base fósil. En relación al estándar RSB-STD-12-001, se puede observar que las tecnologías intensificadas e integradas cumplen con los requerimientos establecidos en por éste en cuanto a la emisión de CO₂ a la atmosfera.

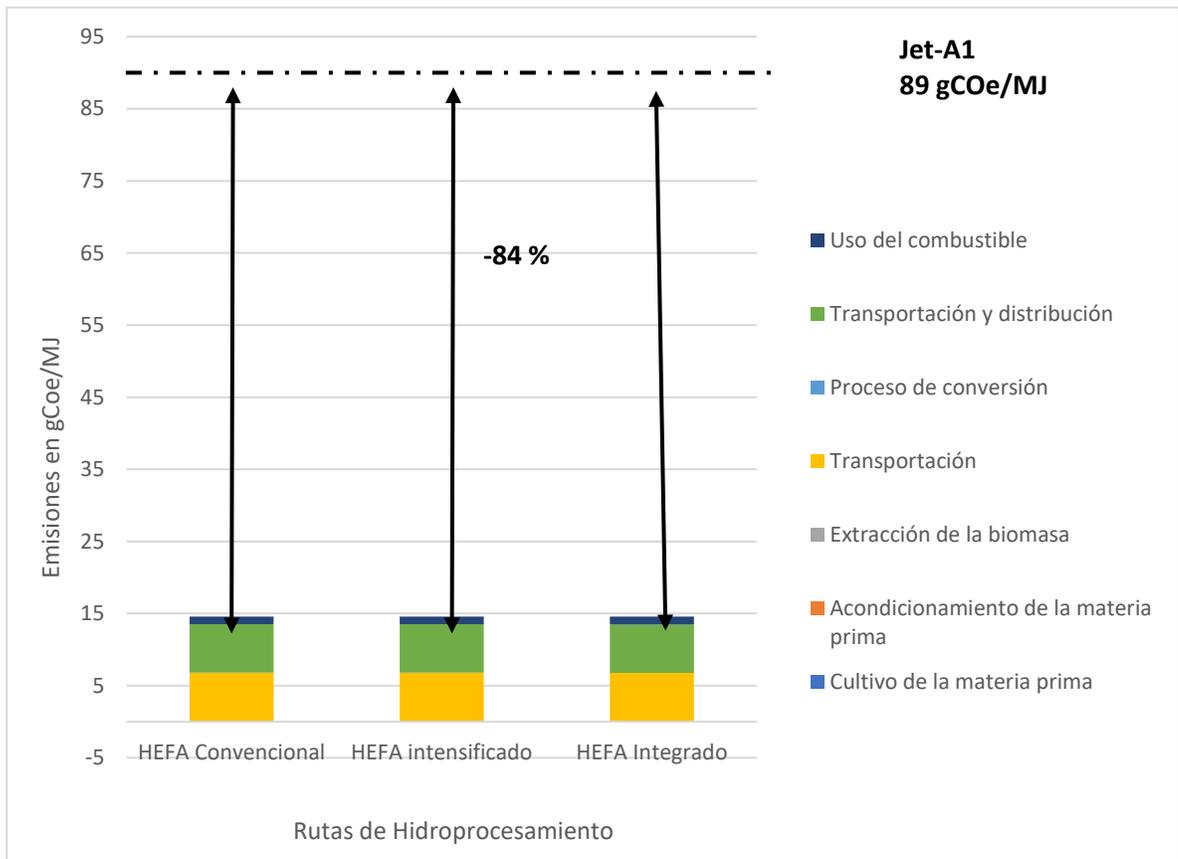


Figure 11 Análisis de ciclo de vida para producir bioturbosina a partir de *J. Curcas*.

9. Conclusiones

En el presente trabajo se ha presentado el análisis de ciclo de vida para los procesos de producción de SAF a través de las tecnologías de hidrotreatmento convencional, integrado e intensificado utilizando la *J. Curcas* como materia prima para cumplir con lo establecido en el estándar RSB-STD-12-001. Además, se emplearon las bases de datos suministradas por el programa GREET, facilitando la obtención de datos sobre las emisiones generadas en cada fase del análisis.

Se encontró que los procesos intensificados e integrados si presentan una reducción mayor al 10 %; por lo tanto, estas tecnologías cumplen con a la

especificación del estándar. Cabe destacar la significativa reducción para el caso de la tecnología integrada de hidroprocesamiento con .15 % con respecto al resto de las variantes de HEFA convencional e intensificada.

La principal contribución de este trabajo está en presentar que las nuevas tecnologías de procesamiento de combustible mediante HEFA intensificada e integrada pueden pertenecer al CORSIA al cumplir con lo que establece el estándar RSB-STD-12-001 en cuanto a la cantidad de emisiones producidas a través de su ciclo de vida.

Para futuros trabajos se recomienda evaluar el aspecto económico de la producción de biocombustible además de los requisitos legales que indica el estándar ya que en este trabajo se enfocó en la cantidad de emisiones producidas para la conversión de bioturbosina.

10. Referencias

- Abrantes, I., Ferreira, A. F., Silva, A., & Costa, M. (2021). Sustainable aviation fuels and imminent technologies - CO2 emissions evolution towards 2050. *Journal of Cleaner Production*, 313(February).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127937>
- Asmelash, E., Boshell, F., & Castellanos, G. (2020). Reaching Zero With Renewables BIOJET FUELS. In *The International Renewable Energy Agency (IRENA)*.
- ASTM-Commite. (2021). *Standard Specification for Aviation Turbine Fuels (ASTM D1655-21a)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1655-21A>
- Bailis, R. E., & Baka, J. E. (2010). Greenhouse gas emissions and land use change from *Jatropha curcas* -based jet fuel in brazil. *Environmental Science and Technology*, 44(22), 8684–8691. <https://doi.org/10.1021/es1019178>
- Bio4A. (2019). *Advanced Sustainable BIOfuels for Aviation*. 789562, 29.
- Capaz, R. S., & Seabra, J. E. A. (2016). Life Cycle Assessment of Biojet Fuels. In *Biofuels for Aviation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804568-8.00012-3>
- Chintakanan, P., Vitidsant, T., Reubroycharoen, P., Kuchonthara, P., Kida, T., & Hinchiranan, N. (2021). Bio-jet fuel range in biofuels derived from hydroconversion of palm olein over Ni/zeolite catalysts and freezing point of biofuels/Jet A-1 blends. *Fuel*, 293, 120472.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120472>
- Deane, P., Gallachóir, B. Ó., & Shea, R. O. (2017). Biofuels for Aviation. In *Europe's Energy Transition - Insights for Policy Making* (Issue January).
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809806-6.00012-2>
- Demirbas, A. (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global

- biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2106–2116.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.02.020>
- Demirel, Y. (2021). Energy Conservation. *Green Energy and Technology*, 355–406. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56164-2_9
- Dimian, A. C., Bildea, C. S., & Kiss, A. A. (2014). Process Intensification. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 35). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62700-1.00010-3>
- Du, X., Li, D., Xin, H., Zhou, W., Yang, R., Zhou, K., & Hu, C. (2019). The Conversion of Jatropha Oil into Jet Fuel on NiMo/Al-MCM-41 Catalyst: Intrinsic Synergic Effects between Ni and Mo. *Energy Technology*, 7(5).
<https://doi.org/10.1002/ente.201800809>
- Gómez-Castro, F. I., Gutiérrez-Antonio, C., Romero-Izquierdo, A. G., May-Vázquez, M. M., & Hernández, S. (2023). Intensified technologies for the production of triglyceride-based biofuels: Current status and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113580.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113580>
- Góngora, C., Martínez, G., Vázquez, A., & López, G. (2018). *Paquete Tecnológico: el Cultivo de Jatropha curcas L. en el sureste de México*.
- Guo, F., Wang, X., & Yang, X. (2017). Potential pyrolysis pathway assessment for microalgae-based aviation fuel based on energy conversion efficiency and life cycle. *Energy Conversion and Management*, 132, 272–280.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.020>
- Guo, F., Zhao, J., A, L., & Yang, X. (2016). Life cycle assessment of microalgae-based aviation fuel: Influence of lipid content with specific productivity and nitrogen nutrient effects. *Bioresource Technology*, 221, 350–357.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.044>
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F. I., de Lira-Flores, J. A., & Hernández, S.

- (2017). A review on the production processes of renewable jet fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(May), 709–729.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.108>
- Gutiérrez-Antonio, Claudia, Romero-Izquierdo, A. G., Gómez-Castro, F. I., Hernández, S., & Briones-Ramírez, A. (2016). Simultaneous energy integration and intensification of the hydrotreating process to produce biojet fuel from jatropha curcas. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 110(2016), 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.10.007>
- Gutiérrez, H. (2008). *Analisis y Diseño De Experimentos De Montgomery*.
- Handler, R. M., Shonnard, D. R., Kalnes, T. N., & Lupton, F. S. (2014). Life cycle assessment of algal biofuels: Influence of feedstock cultivation systems and conversion platforms. *Algal Research*, 4(1), 105–115.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.12.001>
- Hassan, S. H., Attia, N. K., El Diwani, G. I., Amin, S. K., Ettouney, R. S., & El-Rifai, M. A. (2023). Catalytic hydrocracking of jatropha oil over natural clay for bio-jet fuel production. *Scientific Reports*, 13(1), 13419.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-40500-2>
- Holladay, J., Zia, A., & Heyne Joshua. (2020). Review of Technical Pathways. *U.S Department of Energy*.
- IATA. (2018). *Aim for 1 Billion Passengers to Fly on Sustainable Fuel Flights by 2025*.
- IATA. (2021). *Aviation & Climate Change Fact Sheet. 2025(July)*, 1–2.
- Instituto Mexicano del Petroleo. (2016). *Reporte de inteligencia Tecnologica BIOTURBOSINA*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/324018/Inteligencia_Tecnologica_Bioturbosina_Final.pdf

- International Air Transport Association. (2019). *Carbon Offsetting for International Aviation*. 4. <https://www.iata.org/policy/environment/Documents/paper-offsetting-for-aviation.pdf>
- Li, Q., Cai, H., & Han, J. (2017). *Life-Cycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions and Water Consumption—Effects of Coal and Biomass Conversion to Liquid Fuels as Analyzed with the GREET*. <https://www.osti.gov/biblio/1372111>
- Li, X., & Mupondwa, E. (2014). Life cycle assessment of camelina oil derived biodiesel and jet fuel in the Canadian Prairies. *Science of the Total Environment*, 481(1), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.003>
- Lokesh, K., Sethi, V., Nikolaidis, T., Goodger, E., & Nalianda, D. (2015). Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance. *Biomass and Bioenergy*, 77, 26–44. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.005>
- Meyer, K., Weinberg, J., & Kaltschmitt, M. (2012). GHG emissions from jatropha-based bioderived synthetic paraffinic kerosene. *Biofuels*, 3(6), 657–674. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.57>
- O’Connell, A., Kousoulidou, M., Lonza, L., & Weindorf, W. (2019). Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101(December 2018), 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.033>
- Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Kusumo, F., Raja Shahrizzaman, R. M. H., & Shamsuddin, A. H. (2021). Modeling and optimization of microwave-based bio-jet fuel from coconut oil: Investigation of response surface methodology (rsm) and artificial neural network methodology (ann). *Energies*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/en14020295>
- Prussi, M., Weindorf, W., Buffi, M., Sánchez López, J., & Scarlat, N. (2021). Are algae ready to take off? GHG emission savings of algae-to-kerosene

- production. *Applied Energy*, 304.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117817>
- Resurreccion, E. P., Roostaei, J., Martin, M. J., Maglinao, R. L., Zhang, Y., & Kumar, S. (2021). The case for camelina-derived aviation biofuel: Sustainability underpinnings from a holistic assessment approach. *Industrial Crops and Products*, 170(February).
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113777>
- Ringsred, A., van Dyk, S., & Saddler, J. J. (2021). Life-cycle analysis of drop-in biojet fuel produced from British Columbia forest residues and wood pellets via fast-pyrolysis. *Applied Energy*, 287(February).
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116587>
- Rodriguez-Acosta, M., Vega-Flores, K., De Gante-Cabrera, V. H., & Jiménez-Ramírez, J. (2009). Distribución del género *Jatropha* L. (Euphorbiaceae) en el estado de Puebla, México. *Polibotánica*, 37–48.
- Romero-Izquierdo, A. G., Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F. I., & Hernández, S. (2017). *Energy Integration and Optimization of the Separation Section in a Hydrotreating Process for the Production of Biojet Fuel* (pp. 661–666).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50112-4>
- RSB. (2021). *RSB STANDARD FOR ICAO CORSIA (RSB-STD-12-001-Version 1.2)*. RSB - Roundtable on Sustainable Biomaterials. <http://www.rsb.org>
- Sadhukhan, J., & Sen, S. (2021). A novel mathematical modelling platform for evaluation of a novel biorefinery design with Green hydrogen recovery to produce renewable aviation fuel. *Chemical Engineering Research and Design*, 175(1), 358–379. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.09.014>
- SAGARPA. (2017). *Planeación agrícola nacional 2017-2030. Bioenergéticos: higuierilla, jatropha curcas, sorgo dulce mexicanos*. 32.
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257070/Potencial->

Bioenerg_ticos.pdf

- Shi, R., Ukaew, S., Archer, D. W., Lee, J. H., Pearlson, M. N., Lewis, K. C., & Shonnard, D. R. (2017). Life Cycle Water Footprint Analysis for Rapeseed Derived Jet Fuel in North Dakota. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(5), 3845–3854.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02956>
- Song, M., Zhang, X., Chen, Y., Zhang, Q., Chen, L., Liu, J., & Ma, L. (2023). Hydroprocessing of lipids: An effective production process for sustainable aviation fuel. *Energy*, 283, 129107.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129107>
- Su, W., Ye, Y., Zhang, C., Baležentis, T., & Štreimikienė, D. (2020). Sustainable energy development in the major power-generating countries of the European Union: The Pinch Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 256.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120696>
- Technologies Office, B. (2020). *Sustainable Aviation Fuel: Review of Technical Pathways*. <https://doi.org/10.2172/1660415>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2014). *U . S . Environmental Protection Agency Energy Treasure Hunt Guide : Simple Steps to Finding Energy Savings*. 430.
- Vásquez, M. C., Martínez, A., Castillo, E. F., & Silva, E. E. (2019). Holistic approach for sustainability enhancing of hydrotreated aviation biofuels, through life cycle assessment: A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, 237(2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117796>
- Vela-García, N., Bolonio, D., García-Martínez, M. J., Ortega, M. F., Almeida Streitwieser, D., & Canoira, L. (2021). Biojet fuel production from oleaginous crop residues: thermoeconomic, life cycle and flight performance analysis. *Energy Conversion and Management*, 244, 114534.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114534>

Wang, W.-C., Tao, L., Markham, J., Zhang, Y., Tan, E., Batan, L., Bidy, M.,
Wang, W.-C., Tao, L., Zhang, Y., Tan, E., Warner, E., & Bidy, M. (2016).
*Review of Biojet Fuel Conversion Technologies. National Renewable Energy
Laboratory, Technical Report NREL/TP-5100-66291. July, 98.*
<https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66291.pdf>

Yang, S., Chen, B., & Ulgiati, S. (2016). Co-benefits of CO₂ and PM_{2.5} Emission
Reduction. *Energy Procedia, 104*, 92–97.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.017>

Yilmaz, N., & Atmanli, A. (2017). Sustainable alternative fuels in aviation. *Energy,*
140, 1378–1386. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.077>