

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

**FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Maestría en Ciencias de la Energía

**OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOTURBOSINA**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias de la Energía

Presenta: Ing. Deicy María Matos Ríos

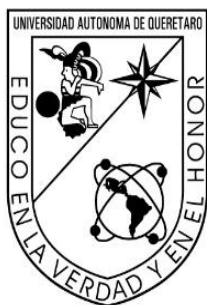
Dirigido por: Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Co-dirigido por: Dr. José María Ponce Ortega

Centro Universitario, Santiago de Querétaro, Qro.

Octubre 2019

México



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ciencias de la Energía

Tema de tesis:

“Optimización de la cadena de suministro para la producción de bioturbosina”

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias de la Energía

Presenta:

Ing. Deicy María Matos Ríos

Dirigido por:

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Co-dirigido por:

Dr. José María Ponce Ortega

Comité

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Presidente

Dr. José María Ponce Ortega

Secretario

Dr. José Santos Cruz

Vocal

Dr. Fernando Israel Gómez Castro

Suplente

Dr. Rufino Nava Mendoza

Suplente

Centro Universitario, Santiago de Querétaro, Qro.

Octubre, 2019

México

RESUMEN

El sector de la aviación tiene una creciente demanda de combustibles, dado que se pronostica que crecerá a un ritmo de 4.8% anual hasta el 2036. En este contexto, es fundamental el desarrollo de combustibles renovables de aviación que satisfagan la demanda de combustibles de manera parcial o total. Por ello, es de vital importancia la determinación óptima de la cadena de suministro para su producción; dado que el uso eficiente de los recursos permitirá tener procesos de producción sustentables y biocombustibles de mínimo impacto ambiental. En 2017 que Domínguez-García y colaboradores, propusieron una estrategia de planificación para la producción de bioturbosina mediante un modelo de optimización multiobjetivo MILP para la producción de bioturbosina. En ambos trabajos consideraron la producción de bioturbosina a partir de aceites vegetales de cultivos energéticos con el suministro de hidrógeno de origen fósil, para las rutas de procesamiento que lo requieren; en su último trabajo consideraron el uso de biomasa comestible como aceite de soya, además de la producción de hidrógeno convencional y renovable. En ambos trabajos se optimizaron objetivos económicos y ambientales. Igualmente, en 2018 Gregorio-Gutiérrez y colaboradores presentaron en un modelo matemático MILP para optimización multiobjetivo de funciones ambientales y sociales de la optimización cadena de suministro para obtener bioturbosina a partir de salicornia bigelovii mediante la ruta de procesamiento Fischer-Tropsch. Por lo tanto, el presente trabajo se enfoca en la determinación de la cadena óptima de suministro para la producción de bioturbosina, mediante el hidrotatamiento de aceites vegetales no comestibles como los de *Jatropha curcas*, camelina, palma de aceite y la higuera, así como la generación de hidrógeno renovable a partir de la biomasa de estas mismas materias primas. Para ello se realiza el modelado de la cadena de suministro considerando materias primas cultivables en los diferentes estados de México, su procesamiento para la obtención de bioturbosina e hidrógeno renovable, así como la distribución de la bioturbosina en la red de aeropuertos mexicanos y su posible exportación. Los resultados muestran que en el mejor escenario se obtiene una ganancia anual de \$337,862,932.17 MXN. De los 32 estados del país se produce biomasa en 26; mientras que en los estados de Chiapas, Chihuahua, Durango, Michoacán, Nayarit, Veracruz, Yucatán, Zacatecas, Guerrero, Jalisco y Edo. de México se produce la bioturbosina, y en los 3 últimos también se produce el hidrógeno renovable, supliendo la demanda de este gas para la producción del biocombustible. Adicionalmente, la producción de bioturbosina a partir de biomasa disminuye en 27.6 % las emisiones liberadas a la atmósfera, en comparación con la turbosina de origen fósil.

Palabras clave: bioturbosina, hidrotatamiento, cadena de suministro, hidrógeno renovable, emisiones de gases de efecto invernadero.

ABSTRACT

The aviation sector has a growing demand for fuels, since it is predicted that it will grow at a rate of 4.8% per year until 2036. In this context, the development of renewable aviation fuels that meet the demand for fuels, either partially or totally, is essential. Therefore, the determination of the optimal supply chain for its production is vital; given that the efficient use of resources will allow sustainability for both, production processes and biofuels with minimal environmental impact. In 2017, Domínguez-García and collaborators proposed a planning strategy for bio jet fuel production through a multi-objective optimization model MILP for bio jet fuel production. In both works, consider the production of bio jet fuel from vegetable oils from energy crops with the supply of hydrogen of fossil origin, for the processing routes that use it; in your last work consider the use of edible biomass as soybean oil, in addition to the production of conventional and renewable hydrogen. In both works, economic and environmental objectives are optimized. Similarly, in 2018 Gregorio-Gutiérrez and collaborators in a mathematical MILP model for multi-objective optimization of environmental and social functions of supply chain optimization to obtain biojet fuel from *salicornia bigelovii* through the Fischer-Tropsch processing route. Therefore, the present work focuses on the determination of the optimal supply chain for the production of biojet fuel, through the hydrotreatment of non-edible vegetable oils such as those obtained from *jatropha curcas*, *camelina*, palm oil and castor oil, along with the generation of renewable hydrogen from the biomass of these same raw materials. To do this, the modelling of the supply chain will be carried out considering raw materials cultivable in the different states of Mexico; it's processing to obtain renewable bio jet fuel and hydrogen, as well as the distribution of bio jet fuel in the Mexican airport network and its possible exportation. The results show that in the best scenario an annual profit of \$337,862,932.17 MXN is obtained. From the 32 Mexican states biomass is produced in 26; while in Chiapas, Chihuahua, Durango, Michoacán, Nayarit, Veracruz, Yucatán, Zacatecas, Guerrero, Jalisco and State of México is produced bio jet fuel, and in the last 3 states renewable hydrogen is also produced, of such gas for production of the biofuel. Additionally, the production of bio jet fuel from biomass decreases the emissions released into the atmosphere by 27.6%, in comparison with fossil jet fuel.

Keywords: Biojet fuel, hydro treatment, supply chain, renewable hydrogen, greenhouse gas emissions.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente al espíritu santo de Dios por darme fuerzas cuando las creía perdidas y poner en mi camino las personas que me han servido, motivado y ayudado a mantener mi enfoque en los propósitos determinantes de mi vida.

A mi familia que siempre han creído en mí y en mis capacidades sin dudarlo ni un instante, porque su amor es tan grande que a pesar de la distancia los he sentido tan cerca, siempre a mi lado, en especial a mis padres y mis hermanos sobretodo a tí Maryurita, por manifestarme siempre sus deseos de verme feliz y llena siempre satisfacciones por perseguir y cumplir mis sueños y ayudarme a realizarlos, ya sea con motivación y con tu gran amor y afecto, los amo y siempre estaré agradecida con Dios por regalarme el privilegio de pertenecer a esta familia y tener la dicha de una gemela que aunque piense diferente a mí, este de mi lado siempre que lo necesite y recuerda que yo también estaré por siempre también para ti, nuestro lazo no es solo de sangre, es de amor y lealtad, asimismo quiero resaltar en especial a mis sobrinos, Mariana Sofía, Andrés David, Víctor Manuel y la peque Adriana Lucia, que con su inocencia, risas, travesuras, ocurrencias y besos de video llamadas me han sacado sonrisas inmensas que desde mi corazón motivándome siempre a seguir y no abandonar mis sueños, los amo de aquí al infinito.

A los mentores y compañeros de aventura en este proyecto, a la Dra. Claudia por invitarme a participar de este hermoso proyecto, que me dio un giro de 360 grados a mi crecimiento profesional y creer en mis capacidades, por no solo ofrecerme ser mi directora de tesis, y su amistad y cariño, al Dr. José María por su apoyo incondicional, recibirme como parte de su equipo de trabajo desde el momento que llegue a Morelia y por cada uno de sus estudiantes de doctorado y maestría que se convirtieron en grandes amigos para mi vida.

A ti mi prima INE, porque sin tu apoyo y motivación para vivir una aventura diferente y muy divertida. Porque no solo disfrute de la cultura, los lugares y personas increíbles, además de estudiar en este país y apoyarme en mi

crecimiento laboral y personal, para abrirme un horizonte más amplio del mundo y sus oportunidades y eres un ejemplo de disciplina, dedicación y verraquera. Te quiero mucho y sabes que nos une un lazo de amistad, sangre y familiaridad, basado en el respeto y el deseo de salir adelante, cumpliendo nuestros sueños.

A todas esas amistades en este país maravilloso y en mi amada Colombia, que desde sus diferentes posiciones me han regalado una voz de aliento, con algún consejo, una palabra, su apoyo o simplemente su amistad sincera, en especial al Dr. Santos, Naty, porque siempre estuvieron dispuestos y disponibles para mí cuando necesite de ayuda, consejo o fuerzas para no desistir, a Eli, “mi carita”, Monik, Kary, Chely con su familia, al Dr. Rodri, a Bri, a todos mis compañeros del post grado, a mis amigos de maestría, Lau, Lina, Jorge, Oscar, Luis, Jesús y Demetrio, a este último muchas gracias por su apoyo y amistad, y no podía dejar pasar por alto tu apoyo invaluable para mí, porque cuando más necesite de una voz no solo para motivarme y no sentirme sola con una mano apoyándome y agarrándomela fuerte fue la tuya mi corazón, José Fernando Jiménez Valencia. A todos y cada uno de las personas mencionadas y a las que no hice por tiempo o espacio, pero que saben que contribuyeron en mi vida y proyecto de vida, muchas, muchísimas gracias desde mi corazón y todo mi ser, en mí tendrán una amiga siempre, leal y sincera.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado mediante el proyecto 239765. Asimismo se agradece al Fondo SENER-CONACYT por la beca de manutención otorgada a Deicy María Matos Ríos para la realización de sus estudios de posgrado.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	
ABSTRACT	
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS	i
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	vi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	2
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	4
2.1 Biocombustibles para el sector de la aviación	4
2.1.1 Cultivos energéticos para producir bioturbosina.....	7
2.2 Procesos de producción de bioturbosina	8
2.3 Políticas ambientales y económicas para la producción de bioturbosina.....	11
2.4 La cadena de suministro de biocombustibles.....	14
2.4.1 La cadena de suministro para la producción de bioturbosina	18
C:\Users\deysi\Documents\Deisy\Tesis\Archivos recuperados\Tesis MCE Deisy\TESIS DEICY MATOS RIOS FINAL 4.docx - _Toc194862912.5. Justificación.....	23
CAPÍTULO 3. OBJETIVOS.....	24
3.1 OBJETIVO GENERAL	24
3.2 OBJETIVOS PARTICULARES	24
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	25
4.1 Modelado de la cadena de suministro para la producción de bioturbosina mediante el hidrotreamiento de aceites vegetales.....	25
4.1.1 Superestructura.....	26_Toc19486301
4.1.2 Modelo Matemático	27
4.2 Modelado de la producción de hidrógeno renovable mediante el craqueo de aceites vegetales en el software Aspen Plus.....	45

4.3	Estimación de parámetros de los modelos.....	45
4.4	Definición de escenarios para los modelos propuestos.	49
4.4.1	<i>Escenario de estudio I</i>	49
4.4.2	<i>Escenario de estudio II</i>	49
4.4.3	<i>Escenario de estudio III</i>	50
4.4.4	<i>Escenario de estudio IV</i>	50
4.4.5	<i>Escenario de estudio V</i>	51
	CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	52
5.1	Escenario de estudio I. Maximización de la ganancia con satisfacción de la demanda nacional de bioturbosina	52
5.2	Escenario de estudio II. Maximización de la ganancia, satisfaciendo la demanda local de bioturbosina.....	57
5.3	Escenario de estudio III. Maximización de la ganancia, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa en cada estado y satisfaciendo la demanda nacional de bioturbosina.....	64
5.4	Escenario de estudio IV. Maximización de la ganancia, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa en cada estado y satisfaciendo la demanda local de bioturbosina	68
5.5	Escenario de estudio V. Curva de Pareto.....	72
5.5.1	Solución Compensada.....	74
	CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	79
	REFERENCIAS	81
	ANEXO 1. CÓDIGO DEL MODELO MATEMÁTICO PROGRAMADO EN GAMS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rutas de producción de bioturbosina y otros biocombustibles a partir de diferentes tipos de biomasa.	9
Figura 2. Esquema de proceso de hidrotratamiento para producción de bioturbosina	11
Figura 3. Cadena de suministro de biocombustibles. Elaboración propia	19
Figura 4. Esquema de la cadena de suministro de bioturbosina.....	20
Figura 5. Superestructura de la cadena de suministro para la producción de bioturbosina	26
Figura 6. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio I	57
Figura 7. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio II	63
Figura 8. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio III	68
Figura 9. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio IV.....	72
Figura 10. Curva de frente de Pareto para solución compensada Ganancia vs Emisiones	74
Figura 11. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio V	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Actores involucrados en la cadena de suministro de bioturbosina en México.....	20
Tabla 2. Nomenclatura	27
Tabla 3. Lista de parámetros y conjuntos estimados en el modelo matemático.	46
Tabla 4. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario de estudio I.....	53
Tabla 5. Resumen de resultados del escenario de estudio I. Maximización de la ganancia con satisfacción de la demanda nacional de bioturbosina	54
Tabla 6. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario II	59
Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos en el escenario de estudio II. Maximización de la ganancia, satisfaciendo la demanda local de bioturbosina	60
Tabla 8. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario III	65
Tabla 9. Resumen de resultados del escenario de estudio III. Maximización de la ganancia, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa en cada estado y satisfaciendo la demanda nacional de bioturbosina	65
Tabla 10. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario IV.....	69
Tabla 11. Resumen de resultados del escenario de estudio IV. Maximización de la ganancia, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa en cada estado y satisfaciendo la demanda local de bioturbosina.....	70
Tabla 12. Puntos de frente de Pareto	73
Tabla 13. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario V.....	75
Tabla 14. Resumen de resultados del escenario de estudio V: Curva de Pareto.	77

Dirección General de Bibliotecas UAQ

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el tema energético es de gran interés tanto por el incremento y la variabilidad de los precios de los combustibles fósiles como por el problema del cambio climático [1]; lo anterior ha motivado la búsqueda de fuentes energéticas alternativas, que sean viables tanto técnica como económicamente. Así, se ha trabajado en el aprovechamiento de la energía de la radiación solar, del viento, de las corrientes de agua, de las olas, de las corrientes marinas, y la biomasa, entre las más importantes. A partir de estas fuentes energéticas se busca producir electricidad, calor y combustibles para satisfacer las necesidades de la población y los sectores productivos [2]. En particular, el desarrollo del sector del transporte requiere de combustibles que sean renovables; a éstos combustibles se les conoce como biocombustibles y se caracterizan por poseer propiedades muy similares a los de origen fósil [3]. En México se ha dado un fuerte impulso al desarrollo de los biocombustibles, debido a la adherencia de México al Protocolo de Kioto así como a la Ley de Promoción de los bioenergéticos. En este contexto, el sector de la aviación ha establecido estrategias para mitigar el impacto de sus emisiones de CO₂; una de ellas es el desarrollo de un combustible renovable de aviación conocido como bioturbosina, cuyas propiedades fisicoquímicas sean idénticas a las de la turbosina fósil [4]. Para producir la bioturbosina a escala industrial se requiere de la implementación, de manera sustentable, de la cadena de suministro; ésta se define como el conjunto de eslabones que interactúan entre sí, para entregar un bien o producto al mercado o un cliente, desde la obtención de la materia prima, transformación, transporte y consumo al destinatario final [5]. Por ello, la cadena de suministro es fundamental para la producción y distribución de la bioturbosina; asimismo, permitirá contribuir con lo dispuesto en política internacional para la disminución de gases de efecto invernadero en la industria de aviación, y prolongar las reservas petroleras de México [6]. Además, resulta de vital importancia el estudio detallado de cada uno de los eslabones de la cadena de suministro para la producción de bioturbosina; lo anterior permitirá facilitar la intervención adecuada para su desarrollo y crecimiento, equilibrando en lo posible

factores ambientales, económicos y sociales [5]. Así, en el presente trabajo se determinará la cadena óptima de suministro para la producción de bioturbosina, considerando el hidrotatamiento de aceites vegetales, así como la generación de hidrógeno renovable. Para ello se desarrollará un modelo matemático para la planeación óptima de la cadena de suministros para producir bioturbosina e hidrógeno renovable. Las materias primas incluyen cultivos energéticos no comestibles como *Jatropha curcas*, camelina, higuera y palma de aceite. El modelo considera la localización óptima de los cultivos de materias primas, de las plantas de bioturbosina e hidrógeno renovable, así como la distribución de la bioturbosina y subproductos a los mercados, considerando simultáneamente aspectos económicos y ambientales.

1.1. Descripción del problema

En el sector de la aviación, el combustible representa aproximadamente 30% de los costos de una compañía aérea; por ello, las fluctuaciones en los precios del petróleo impactan directamente en la rentabilidad de las aerolíneas, así como en la economía de los consumidores [7]. Adicionalmente, su elevada tasa de crecimiento conlleva no sólo un mayor requerimiento de combustibles, sino que incrementa la generación de emisiones de CO₂, agravando así el problema del cambio climático. Por ello, uno de los grandes retos para el sector de la aviación es reemplazar a la turbosina por bioturbosina, inicialmente de manera parcial, mediante el desarrollo de eficientes tecnologías y apropiadas estrategias de planificación.

Así, para producir bioturbosina a nivel industrial es necesario optimizar la cadena de suministro. Un aspecto importante que debe considerarse es que la bioturbosina debe poseer las mismas propiedades fisicoquímicas de la turbosina, debido a las condiciones de uso durante el vuelo [8]. Con este requisito presente se han desarrollado algunos procesos para la producción de bioturbosina, siendo la mayoría actualmente no rentables debido a los altos costos relacionados la

materia prima e insumos, así como al gasto energético implicado [9]. Otro aspecto importante es que la bioturbosina tiene un mercado muy específico, constituido por la red de aeropuertos nacionales; lo anterior permite delimitar las acciones y esfuerzos para mejorar otros eslabones de la cadena, tales como la disponibilidad de materias primas y rutas eficientes de procesamiento [10]. No obstante, los sitios de cultivo o provisión de biomasa, rutas de procesamiento y los mercados deben considerarse de manera simultánea, para poder determinar la cadena óptima de suministro de la bioturbosina; así se logrará que este biocombustible pueda ser competitivo, mientras se garantiza su suministro constante en los mercados [11]. Cabe añadir que en algunos países del mundo se han desarrollado políticas relacionadas al uso de un porcentaje de bioturbosina en los aviones para poder aterrizar en sus territorios; esto conlleva a que aquellos países que no puedan cumplir con tal requerimiento queden fuera de ruta. Dichas políticas podrían afectar al mercado mexicano en caso de no disponer del biocombustible, por lo que resulta de vital importancia el impulso al establecimiento de la cadena de suministro de bioturbosina en México [12-13].

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

En los últimos años el uso de las energías renovables se ha vuelto más importante, debido al número limitado de regiones con la capacidad para la producción de combustibles derivados del petróleo [14]. Cabe notar que la tecnología requerida para la extracción y procesamiento del petróleo actualmente es más especializada debido a las dificultades en cuanto a terrenos, zonas o estructura donde se encuentre los yacimientos o se descubra presencia del petróleo que implica mayor precisión e inversión para este proceso que antes; adicionalmente, el petróleo ya alcanzó su nivel máximo de producción en la década anterior [15-16]. Este hecho es de gran relevancia, dado su amplio y creciente uso en los sectores del transporte y la industria, lo cual ha generado una demanda insostenible para mantener la funcionabilidad y desarrollo de la sociedad actual [17-18]. En particular, en el sector del transporte los combustibles líquidos son los más usados para satisfacer la mayor parte de la energía requerida. Se estima que el consumo de los combustibles del sector transporte aumentará en 1.1 % por año desde el 2012 hasta el 2040 [8,19]. Aunado a esto se tiene el problema del cambio climático, causado por el incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero, GEI, en la atmósfera debido al uso excesivo de los combustibles fósiles; entre los GEI, el CO₂ es el principal [1, 20, 21]. En 2016, del total de emisiones antropogénicas mundiales de CO₂, el 34% (17 millones de Gton) fueron generadas por el sector del transporte [22]. A su vez, de las emisiones de CO₂ generadas por el sector transporte, el 9% corresponden a la aviación [5, 23, 24]. Este porcentaje puede incrementarse de manera representativa, debido a que se pronostica un crecimiento del sector de 4.8% hasta el año 2040 [25-26].

2.1 Biocombustibles para el sector de la aviación

En el sector de la aviación se prevé que la demanda mundial de viajes aéreos de pasajeros, medida en pasajeros/km de pago, aumente en un 5 % anual entre 1990

y 2050; mientras que se estima que el uso total de combustible de aviación, incluyendo transporte de pasajeros y carga así como operaciones militares, aumente a razón de 3% por año, en el mismo período [27-28]. De igual manera, la proporción del consumo de combustible de las aeronaves civiles (para pasajeros y carga) y militares era de 64% y 36% en 1976, respectivamente; este dato se modificó a 82% y 18% en 1992, respectivamente. Las proyecciones indican que estos valores cambiarán a 97% y 3% en 2050, respectivamente [7, 29–31]. Esto conlleva importantes consecuencias ambientales, derivadas principalmente del incremento en las emisiones de GEI. Ante esta problemática, el sector de la aviación se ha comprometido con la sostenibilidad y estabilización de emisiones de CO₂ en 2020 [32]. Por ello, el sector de la aviación se ha propuesto como objetivos mejorar la eficiencia de los motores en una media de un 1.5% anual hasta 2020, un crecimiento neutro de carbono a partir de ese mismo año, y la reducción en 50% de las emisiones netas en 2050 con respecto a niveles de 2005 [33-34]. Para alcanzar estos objetivos, pioneros en el sector transporte, el sector de la aviación estableció una estrategia global de cuatro pilares [24, 35]. Los primeros tres pilares se centran en las nuevas tecnologías, que posibiliten una mayor eficiencia operativa en los vuelos, la mejora de la infraestructura y la modernización de la gestión del tráfico aéreo [36-37]. El cuarto pilar contempla la implantación de un plan mundial de medidas basadas en el mercado; este plan se aborda mediante una propuesta para la implantación de un plan de compensación y reducción de emisiones de carbono de la aviación internacional, CORSIA por sus siglas en inglés [28, 36, 37]. En junio de 2016, la IATA propuso medidas efectivas y rentables dirigidas a reducir de forma permanente las emisiones de carbono [1], dentro de las cuales identificó tres áreas críticas:

1. Combustibles alternativos.

Los biocombustibles muestran las mayores posibilidades para la reducción de las emisiones de carbono de la aviación. Durante su ciclo de vida tienen el potencial de reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 60%. No obstante, la producción de los biocombustibles no debe competir en la utilización de la tierra para producir

alimentos, y no deben afectar la biodiversidad; asimismo, deben cumplir exactamente las especificaciones técnicas del keroseno de aviación.

2. Navegación aérea.

Este punto se avoca a operaciones más eficientes. Cada Aproximación en Descenso Continuo (CDA) ahorra entre 150 y 600 kg de CO₂. Cada Salida Limpia (CAD) ahorra entre 600 y 5,000 kg de CO₂. Sin embargo, actualmente sólo se pueden aprovechar estas eficiencias en menos del 50% de los aeropuertos europeos [24, 38].

3. Medidas económicas.

En este punto se pretende que los gobiernos de todos los países acuerden medidas que permitan reducir las emisiones de la aviación. Lo anterior se logrará en conjunto con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y el Grupo de 15 Gobiernos sobre Aviación Internacional y Cambio Climático (GIACC). Esta propuesta se presentó en el Protocolo de Kioto, y se acordó el G8 en Japón en junio de 2008 [24].

De las áreas anteriormente mencionadas, la IATA ha identificado el desarrollo del combustible de aviación renovable [27-28], conocido como bioturbosina, como la estrategia más prometedora para reducir el impacto medioambiental del sector aeronáutico. La bioturbosina consiste en hidrocarburos lineales y ramificados dentro del punto de ebullición del C8-C16, y su principal diferencia con la turbosina de origen fósil es la presencia de compuestos aromáticos; dichos compuestos pueden o no estar presentes dependiendo del proceso de producción [10,39]. Si los compuestos aromáticos no están presentes, las partículas emitidas a partir de la quema de bioturbosina son inferiores a las generadas con turbosina convencional. Sin embargo, la carencia de compuestos aromáticos puede causar desgaste en ciertos tipos de motores, ya que estos compuestos se requieren para mejorar la impermeabilidad en las juntas en anillos y por ende los sellos en los motores [40-41]. Por lo tanto, el uso de bioturbosina se establece en mezclas hasta de 50% de volumen con turbosina fósil, de acuerdo con el estándar ASTM D7566-19 [16]. El uso de estas mezclas presenta ventajas comparativas en cuanto

a la baja producción de emisiones de CO₂, además de su bajo contenido de azufre [26, 42].

2.1.1 Cultivos energéticos para producir bioturbosina

Los insumos que se han usado hasta el momento para producir bioturbosina incluyen aceites vegetales (comestibles, no comestibles y residuales), biomasa lignocelulósica (residuos agrícolas y forestales), así como azúcares y almidones (residuos agroindustriales). En particular, los aceites no comestibles representan una materia prima viable para la producción de bioturbosina, ya que eliminan la competencia por alimentos, reducen la tasa de deforestación, son ambientalmente amigables y más económicos que los aceites comestibles [5]. Aunque existen diversos aceites no comestibles para la producción de bioturbosina, 4 de ellos poseen el mayor potencial en México: *Jatropha curcas*, camelina, palma de aceite e higuierilla.

La *Jatropha curcas* es un cultivo energético no alimenticio que puede crecer en suelo improductivo y bajo condiciones climáticas desfavorables. Además de tener rendimiento alto de aceite, la planta es resistente a sequías y plagas. Se estima que su semilla tiene un contenido en aceite de 26.4 a 56.9% en peso, y un rendimiento por hectárea de hasta 4 toneladas dependiendo de la zona de cultivo [43]. Por otra parte, la *Camelina sativa* es un cultivo energético no alimenticio que ofrece las ventajas de crecer en suelos infértiles, requerir menos fertilizantes, ser menos susceptible a plagas y servir como cultivo rotacional. Además, el aceite tiene un costo bajo (0.40-0.70 USD/galón); se estima que su semilla tiene un contenido de aceite de 33 a 42 % en peso, y un rendimiento por hectárea de 1 tonelada dependiendo de la zona de cultivo [44].

La higuierilla es una planta que en México se puede encontrar desde los desiertos del norte, hasta los más permisivos climas del sur; lo que demuestra su amplia flexibilidad a cambios de temperatura y precipitación. La semilla de higuierilla contiene un alto contenido de aceite (50 a 70%), y un rendimiento de 1,320 litros /hectárea, en promedio [45]. Finalmente, la palma de aceite es una planta monoica

(con flores femeninas y masculinas), generalmente con tallo único y esbelto. La densidad de su plantación oscila entre 143 y 160 plantas por hectárea, dependiendo de la variedad y zona de cultivo, su rendimiento nacional es de 12.8 toneladas por ha [46].

2.2 Procesos de producción de bioturbosina

La producción y el uso de kerosenos parafínicos sintéticos derivados de la biomasa están avanzando rápidamente. Es importante mencionar que para la producción de la bioturbosina debe utilizarse biomasa energética que no compita con el suministro de alimentos para animales y el ser humano; además, dicha biomasa debe aprovecharse de manera integral para incrementar la eficiencia de los procesos y reducir los costos de producción [9,11,47,48]. En la Figura 1 se muestran algunas rutas de producción de bioturbosina partiendo de diferentes tipos de biomasa.

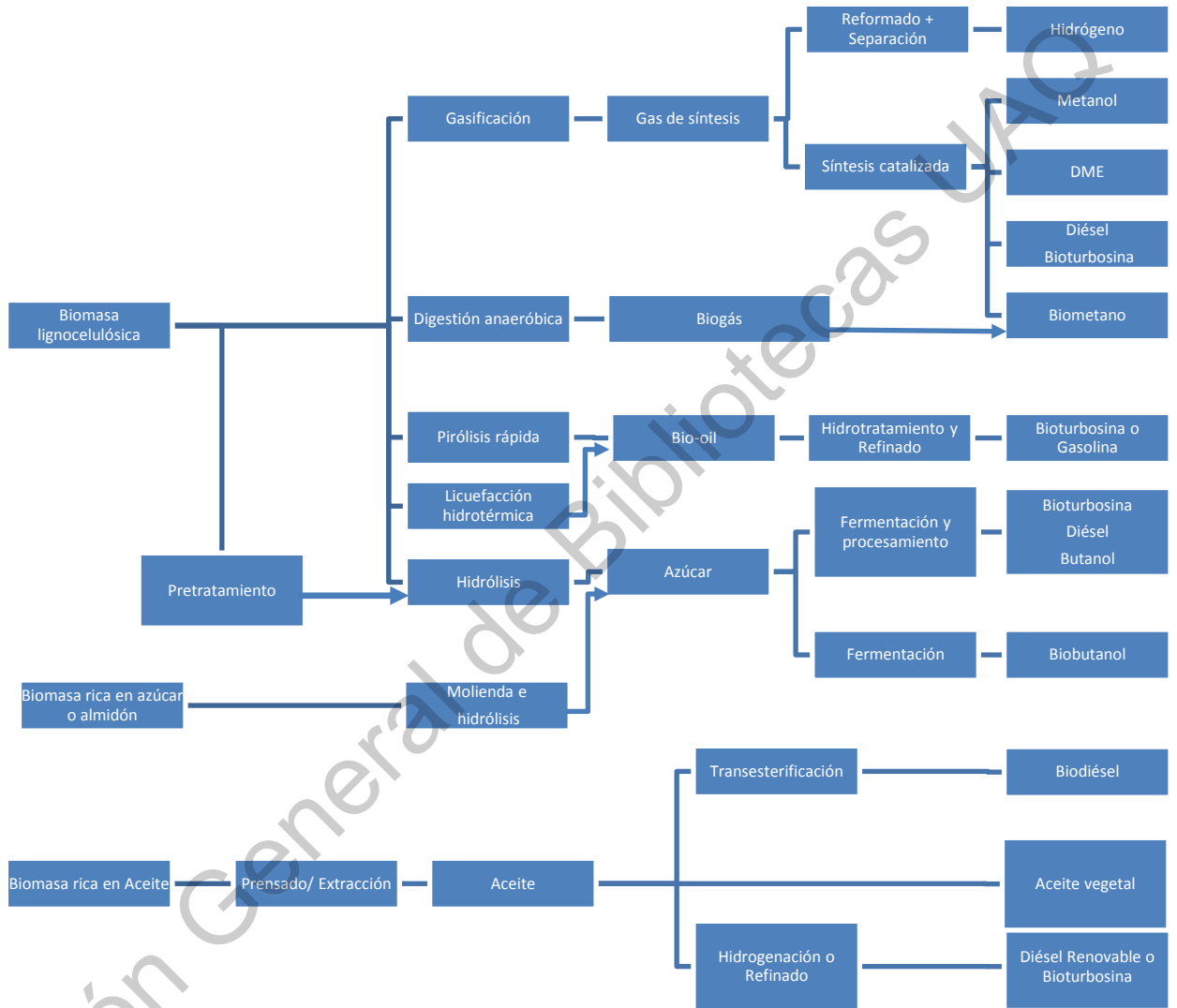


Figura 1. Rutas de producción de bioturbosina y otros biocombustibles a partir de diferentes tipos de biomasa. Fuente:[49-50]

Actualmente, existen diferentes tecnologías para la producción de bioturbosina. De acuerdo con la literatura, los mayores esfuerzos se han centrado en el uso de tecnologías como la síntesis de Fischer-Tropsch (FT) y los procesos de hidrotratamiento (HRJ); porque fueron los primeros en obtener la certificación

ASTM para la producción de bioturbosina para uso comercial. Pocas referencias bibliográficas están disponibles para procesos alcohol a bioturbosina (ATJ) o azúcares a bioturbosina (STJ), dada su reciente certificación. Por otra parte, se ha demostrado recientemente la biosíntesis microbiana diseñada de alcanos de longitud de cadena media, que constituyen la mayor fracción de combustibles de aviación [25-26]. No obstante, de todas las tecnologías el hidrotratamiento es una de las más maduras y avanzadas.

El proceso de hidrotratamiento incluye las reacciones de hidrodeshidrogenación, hidroisomerización e hidrocrackeo de triglicéridos para la obtención de bioturbosina, gases ligeros, naftas y diésel verde. La Figura 2 esquematiza las etapas del proceso para la producción de bioturbosina por hidrotratamiento. En particular, las tecnologías de hidrotratamiento que utilizan aceites vegetales y residuales representan las únicas vías de conversión que están listas para el despliegue a gran escala [42,51].

El proceso de hidrotratamiento consta de dos secciones principales. En la sección reactiva, la materia prima de triglicéridos se convierte por primera vez en hidrocarburos de cadena larga lineal, con hidrógeno y un catalizador sólido a alta presión y temperatura; para ello, se realizan reacciones de desoxigenación y descarbonilación, generando agua, monóxido de carbono y dióxido de carbono como subproductos. Los combustibles lineales de cadena larga generados en el primer reactor entran a un segundo reactor, donde se cortan las cadenas y se produce la isomerización. De esta manera, las cadenas de hidrocarburos están en el rango de C8 - C16, correspondientes a la bioturbosina. Además, se producen gases ligeros, nafta y diésel verde; la separación de los hidrocarburos renovables se realiza, generalmente, por medio de la destilación.

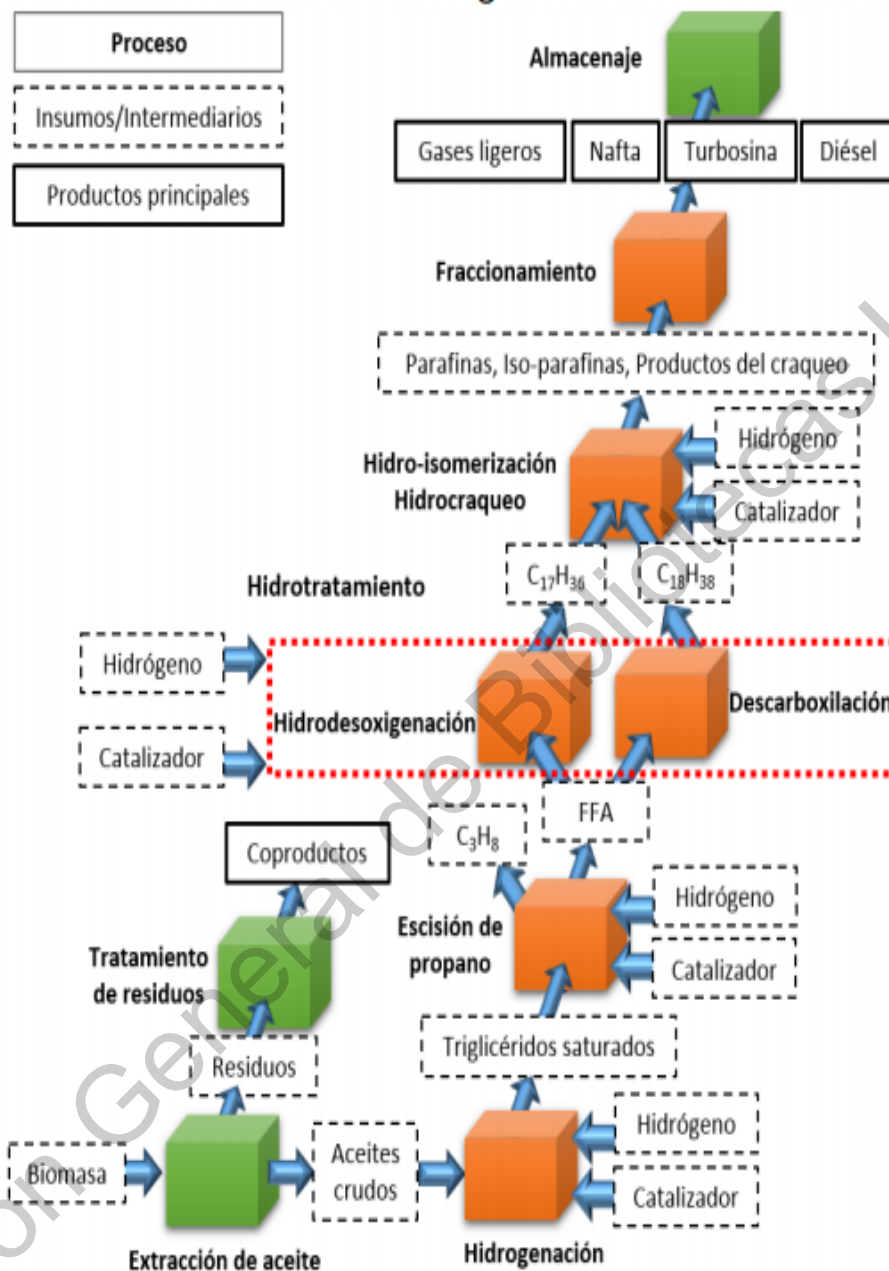


Figura 2. Esquema de proceso de hidrotreatmento para producción de bioturbosina [5]

2.3 Políticas ambientales y económicas para la producción de bioturbosina

México ha desarrollado políticas para el fomento de los diferentes componentes de la cadena de valor y el impulso del mercado de biocombustibles; sin embargo, no

se han desarrollado mandatos para los mercados de combustibles para el transporte [52]. Estas políticas están plasmadas tanto en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos como en Leyes y Reglamentos de carácter específico. En particular, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos - LPDB [52], tiene por objeto la promoción y desarrollo de los bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación de la matriz energética y el desarrollo sustentable; lo anterior como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano y establecer las bases para el desarrollo de la industria de los Bioenergéticos. La LPDB justifica una serie de iniciativas orientadas a generar materia prima para la producción de biocombustibles.

El mercado de bioturbosina en el ámbito internacional está siendo creado por la demanda de las líneas aéreas [52-53]. Así, a nivel internacional las aerolíneas han asumido un papel líder en establecer las cadenas de valor para la producción de bioturbosina. De esta forma, el establecimiento de un mercado sólido de bioturbosina debe considerar el rol de otros actores como son los proveedores de la materia prima, los fabricantes de aviones y motores, los proveedores de tecnología de biorefinación, y la red de aeropuertos. Aun cuando el mercado de bioturbosina es impulsado principalmente por las aerolíneas, los productores de bioturbosina y los fabricantes de equipo tendrán que trabajar en conjunto para consolidar este mercado [21, 54, 55]. Actualmente, la producción comercial de bioturbosina está aún en sus comienzos, los volúmenes que se producen aún son pequeños y la mayoría de las aerolíneas efectúan solo vuelos de prueba; aunque se comienzan a establecer series de vuelos que buscan desplegar cadenas de suministro comercial de bioturbosina. Lo anterior es fundamental para introducir mayores volúmenes al mercado, de hecho la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI) espera un mercado más fuerte hacia el 2020 [1, 55].

Por otra parte, la Secretaría de Energía (SENER) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) han estimado volúmenes de bioturbosina necesarios para cubrir una demanda futura en el país. Al respecto, en la Prospectiva de Energías Renovables 2015-2030, se señala que para tener un

mercado viable de bioturbosina es necesario cubrir 15% de la demanda de turbosina convencional, lo que representaría cerca de 700 millones de litros por año. Lo anterior coincide con lo reportado por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte [21, 29, 56] que indica que se requerirán producir 700 millones de litros de bioturbosina en el 2020 para cubrir 15% de la demanda de turbosina convencional. Por otra parte, el Clúster Bioturbosina del CEMIE-Bio también ha estimado los volúmenes de bioturbosina necesarios para cubrir porcentajes de demanda en el futuro: 1.5 % al 2018 (125 millones de litros), 5.5% al 2024 (258 millones de litros) y 7.5% al 2030 (515 millones de litros) [21, 29, 37].

Por su parte Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) ha llevado a cabo una serie de proyectos orientados a identificar la disponibilidad de biomasa para biocombustibles. Entre éstos se encuentra el estudio de viabilidad de materias primas, realizado con el apoyo del Fondo Sectorial ASA-CONACYT en 2014; este proyecto tuvo como objetivo determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental de insumos potenciales originarios de México, para la producción de biocombustible de aviación. Igualmente, identificar las necesidades particulares para cada insumo, con el fin de asegurar su producción en la escala necesaria para lograr satisfacer la demanda de la industria.

Otra de las entidades relevantes para el desarrollo de la industria de la bioturbosina es la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos (CIB), misma que se creó en el marco de la LPDB [52]. Dicha Comisión es un órgano colegiado encargado de establecer las directrices de la política pública en materia de biocombustibles y está integrada por los titulares de SENER, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Economía (SE) y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) [23, 56, 57].

2.4 La cadena de suministro de biocombustibles

Si bien el proceso de producción de la bioturbosina es fundamental, también deben revisarse las entradas de suministros de materia prima, centros de almacenamiento, logística de transporte, centros de transformación y distribución al destinatario final (ver Figura 3), lo anterior teniendo en cuenta costos de generación de materias primas, costos de producción y transporte del producto terminado (bioturbosina y subproductos). Esto con el objetivo de controlar todas las variables que puedan afectar la rentabilidad o viabilidad del desarrollo de la cadena de suministro de la bioturbosina [12, 35, 58].

En México existen pocos trabajos de investigación y desarrollo enfocados en procesos eficientes de producción de bioturbosina, y en menor proporción al estudio de la cadena de suministro. Sin importar la materia prima utilizada, los procesos de producción de bioturbosina deben tener un reducido impacto ambiental asociado, lo cual puede coadyuvar a incrementar su sustentabilidad. Adicionalmente, debe considerarse que en la cadena completa de suministro también debe tener un reducido impacto ambiental, ya que la industria de la aviación solo utilizará fuentes sostenibles para la fabricación de sus combustibles alternativos [12, 35-36, 38, 58-59]. También, el financiamiento de la investigación y desarrollo de la cadena de suministro debe coadyuvar a que los biocombustibles para avión sean tan competitivos como los de la industria automotriz; con el desarrollo de incentivos iguales o mayores que los de este sector. De esta manera, se logrará la integración de cadenas de valor con baja huella de carbono [60-61].

En estos últimos diez años se han desarrollado nuevos estilos de gestión logística empresarial para cadenas de suministros de diferentes combustibles convencionales y alternativos. Con el cambio climático, principalmente en los Estados Unidos, India, Japón y algunos países de la Unión Europea, se han

adelantado políticas y decisiones para el impulso de este sector. México no ha sido totalmente ajeno a este fenómeno. Poco a poco se está abriendo camino una nueva forma de entender la logística en un espacio de alta competitividad no sólo nacional, sino internacional. Aspectos como el agotamiento de las reservas de petróleo, el cambio climático, y la creciente proyección de actividades en el sector de la aviación comercial, militar y de pasajeros han dado origen a un conjunto de transformaciones en las decisiones sobre producción y localización; dichas transformaciones están dirigidas por la competencia global, dando paso a la reestructuración de los mercados y la organización de la producción [28, 62-63]. La cadena de suministro se refiere, precisamente, a la manera de administrar la compañía y la relación con los otros miembros de la cadena, de una manera efectiva. Se busca proactivamente la integración de oportunidades de mejora en aspectos externos de comunicación y colaboración; tales como la demanda de los mercados, la sostenibilidad y disponibilidad de las materias primas e insumos. También deben considerarse la demografía de los mercados y sus requerimientos, las regulaciones, leyes o políticas de estado, sin olvidar o desmeritar los avances tecnológicos que se tengan en el sector o la industria de biocombustibles. Se reconoce que implantar o establecer sistemas de esta naturaleza es todo un desafío. Incluso, algunos autores señalan que no es sencillo formar parte y manejar toda la red comercial desde el primer proveedor, hasta llegar al consumidor final [60, 62].

El marco de referencia de la cadena de suministro presenta un análisis del concepto de logística y cadena de suministro, para identificar con mayor precisión el significado de estos dos aspectos; posteriormente, expone la filosofía y las características que distinguen a la cadena de suministro, de los que se destacan el tema de aprovisionamiento, así como el de las relaciones de cooperación como elementos estratégicos de la operación global empresarial [61]. El análisis de la cadena de suministro, con un enfoque de sistema, permite desarrollar un marco teórico de referencia para la toma de decisiones en el proceso de su diseño. La

integración del transporte en la cadena de suministro destaca su importancia en la operación de la cadena de suministro. No obstante, el transporte como factor integrador del proceso de abastecimiento y distribución, a lo largo de toda la cadena de valor o de suministro, se constituye como de vital importancia en las relaciones de colaboración entre las empresas de transporte, los agentes logísticos y usuarios del transporte [11].

Por otra parte, la rápida expansión de la industria de biocombustibles ha cambiado el uso de una gran cantidad de cultivos agrícolas, como materia prima energética, y a su vez, afecta la asignación de tierras agrícolas, el equilibrio del mercado de materias primas y el desarrollo económico agrícola en áreas locales [65]. En este contexto se desarrolla el modelo de juego de Stackelberg de dos niveles, y un modelo de juego cooperativo respectivamente para abordar posibles escenarios de asociación comercial entre proveedores de materias primas y biocombustibles. Los modelos determinan el número y la ubicación óptimos de las biorefinerías, los precios requeridos para que estas refinerías compitan por los recursos de materia prima, así como las opciones de uso de la tierra de los agricultores entre alimentos y energía [66].

Por ello, durante la última década, algunos países como Estados Unidos, Brasil, y otros países en Europa han trabajado para acelerar la comercialización de los biocombustibles, mediante el estudio y revisión de la cadena de suministros; algunos de estos combustibles renovables incluyen el biodiésel, bioetanol y la bioturbosina, este último en menor proporción. A continuación, se presentan algunos de estos trabajos reportados en la literatura.

En 2011, se analizaron las cadenas de suministro de combustibles derivados del petróleo y de los biocombustibles. En ese trabajo se plantea un modelo de cadena de suministro determinando la producción de materia prima de biomasa de segunda generación y las tecnologías de procesamiento [15, 59]. Dicho modelo

puede ser usado para implementar las tecnologías que resulten más prometedoras para la generación de biodiésel, y permite comparar con la cadena de suministro de combustibles a base de petróleo.

Bai y You, [31, 66], demostraron en su investigación acerca de la cadena de suministro de biocombustibles que la biomasa debe ser enviada directamente a las biorefinerías cuando la distancia es pequeña; mientras que los depósitos se prefieren a mayores distancias. La configuración híbrida ofrece menores precios mínimos de venta del biocombustible y energía para biorefinerías más grandes. Además, se estudia el impacto de las mejoras en las tecnologías de densificación en la reducción de los costos de transporte y el consumo de energía.

Una de las tendencias actuales y de las orientaciones para lograr la sostenibilidad en la cadena de suministro de biocombustibles y bioenergía se muestran en el trabajo de Wang y Tao [68]. En ese trabajo se aborda una tecnología viable integrada para la conversión de una amplia gama de recursos, como materiales de desecho de la biomasa, cultivos energéticos, desechos sólidos municipales, desechos animales y productos forestales en combustibles y productos químicos. Asimismo, para el bioetanol se analiza la mejor elección entre los diversos recursos disponibles, tecnologías de proceso y la cadena de suministro, así como de diseños de la misma; este objetivo no es tarea fácil de lograr, especialmente cuando la sostenibilidad de la cadena es un criterio primordial para la comercialización del biocombustible [19, 61, 68].

Al igual que en el análisis y desarrollo de la cadena de suministro del bioetanol [61, 69-70], la variación en el costo de producción de la bioturbosina dependería en gran medida de los siguientes parámetros: (a) composición y costo de la materia prima; (b) diseño del proceso; (c) eficiencia de conversión o rendimiento del producto; (d) valorización de coproductos; y (e) conservación de energía. Por lo tanto, disminuir el costo de producción de bioturbosina depende de esfuerzos

sinérgicos en todas las áreas, incluyendo mejoras en las áreas de productividad de materia prima, rendimiento de extracción de aceite o rendimiento de azúcar de los cultivos, conservación de energía de proceso y equilibrio entre producto de combustible de avión y valor subproductos agregados. Además, debe considerarse el impacto de varios factores en el desempeño de la cadena de suministro de biocombustibles: distancia entre el sitio de recolección, procesamiento y el mercado, el cultivo de la biomasa, las tecnologías de procesamiento a utilizar, el tamaño y ubicación de la biorefinería y la eficiencia del proceso [64, 71]. Lo anteriormente expuesto se representa de manera esquemática en la Figura 3.

Por lo tanto, es importante considerar el precio y disponibilidades de la materia prima, así como el consumo energético del proceso; dichas variables se consideran barreras importantes en su producción a lo largo de toda la cadena de suministro del biocombustible. Estos aspectos también deben considerar las regulaciones del gobierno y los beneficios económicos e incentivos que se propongan para cada eslabón de la cadena de suministro, lo que permitirá impulsar las inversiones y los nuevos escenarios gubernamentales, esenciales para el desarrollo de esta actividad; en este contexto, los mecanismos de desarrollo limpio podrían apalancar y fortalecer los retornos de la inversión [73].

2.4.1 La cadena de suministro para la producción de bioturbosina

En México no se ha establecido la cadena de suministro para la producción de bioturbosina; sin embargo, se han realizado algunas iniciativas para incentivar su producción y fomentar el desarrollo de este sector. Una de ellas es el Plan de vuelo hacia los biocombustibles sustentables de aviación en México, que se realizó durante 2010 y 2011 [5, 55, 73]. El proyecto fue encabezado por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) con la colaboración de The Boeing Company. El plan de vuelo fue uno de los primeros proyectos que se reconoce internacionalmente como una mejor práctica para establecer el desarrollo de los

combustibles alternativos de aviación en un país. Su objetivo principal fue integrar a todos los participantes de la cadena de valor de combustibles alternativos de aviación; lo anterior con el objetivo de revisar los insumos disponibles, infraestructura, legislación, logística, distribución y viabilidad económica e identificar barreras y acciones necesarias para el despliegue de una industria de combustibles alternativos en México [57].

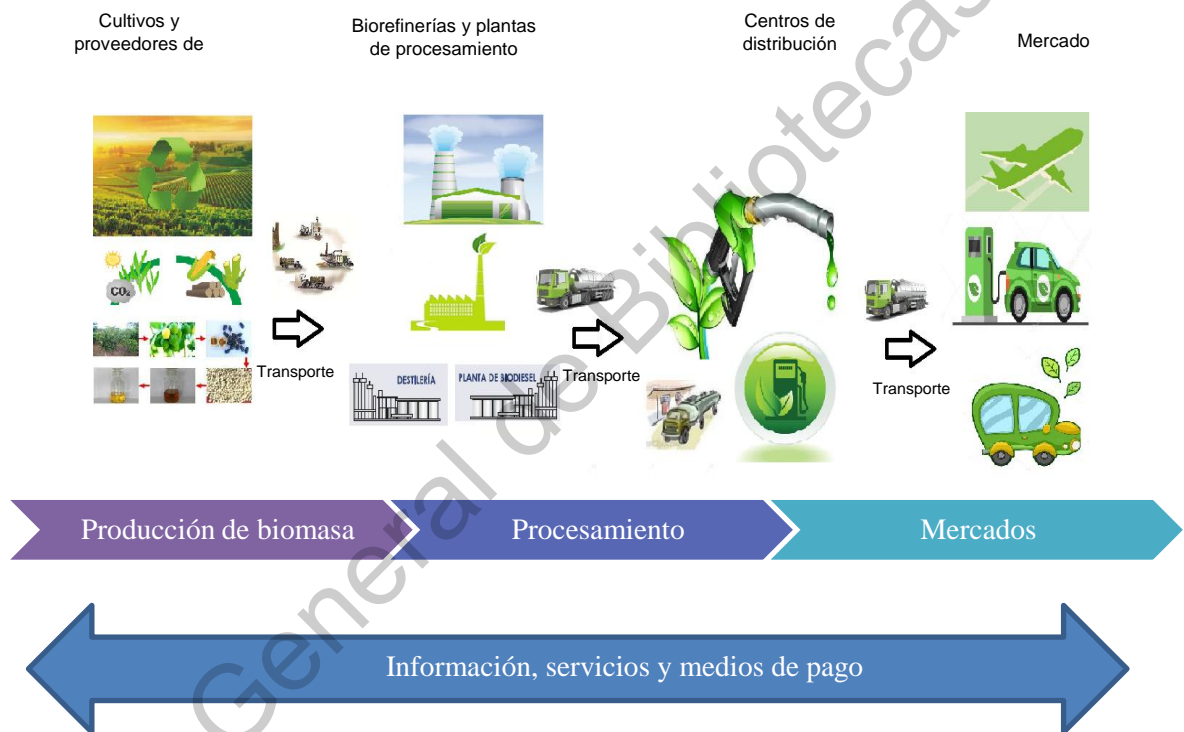


Figura 3. Cadena de suministro de biocombustibles. Elaboración propia

La cadena de suministro de bionturbotina, al igual que la de otros biocombustibles se compone de cinco etapas clave: sistema de producción de biomasa, sistema logístico de biomasa, sistema de producción del biocombustible, sistema de distribución del biocombustible y uso final del biocombustible [75]. Para fines prácticos es posible resumirlas a tres etapas: producción de materia prima, transformación a biocombustibles y uso final del biocombustible, de acuerdo con lo presentado en la Figura 4.



Figura 4. Esquema de la cadena de suministro de bioturbosina (adaptación [35])

De manera específica, la Tabla 1 muestra los principales actores en la cadena de suministro para la producción de bioturbosina. También es necesario considerar a las entidades reguladoras de la industria de biocombustibles relevantes en México, como SENER, SAGARPA, SEMARNAT y la Comisión Reguladora de Energía, CRE.

Tabla 1. Actores involucrados en la cadena de suministro de bioturbosina en México (adaptación propia de [5])

Etapa de la Cadena de Suministro	Principales actores
Producción de biomasa	<ul style="list-style-type: none"> • Productores agrícolas • Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) • Centros de Investigación y Desarrollo Tecnológico (IDT) • Instituciones de Educación Superior (IES) • Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) • Asociación Nacional de Industriales de Aceites y Mantecas Comestibles
Transporte de biomasa	<ul style="list-style-type: none"> • Productores agrícolas • Empresas recolectoras de materia prima
Procesamiento de bioturbosina	<ul style="list-style-type: none"> • Industria • Centros de Investigación y Desarrollo Tecnológico (IDT) • Instituciones de Educación Superior (IES)
Transporte de la bioturbosina	<ul style="list-style-type: none"> • Petróleos Mexicanos (PEMEX) • Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) • Industria
Mercado de bioturbosina	<ul style="list-style-type: none"> • Aerolíneas comerciales nacionales y extranjeras

Por otra parte, recientemente se ha reportado la optimización de la cadena de suministro para la producción de hidrógeno como factor determinante en la generación de combustible para aviones tanto de origen fósil como renovable [76]. Sin embargo, es importante notar que contar solo con un proceso productivo

óptimo no garantiza un precio competitivo de la bioturbosina; para ello debe abordarse el problema considerando la cadena completa de suministro para su producción. También en 2017, se reportó el análisis económico de una cadena de suministro de bioturbosina [47, 76-77]. Este estudio desarrolló un modelo económico regional que simula las etapas producción de un combustible potencial para la aviación; con el planteamiento de la cadena de suministro basado en camelina. El estudio incluye un modelo de equilibrio general que representa los sectores clave de la cadena de suministro, y se parametriza mediante los datos detallados en la Región Noroeste del Pacífico de los Estados Unidos. Asimismo, se modelan escenarios para evaluar la eficacia potencial de las políticas que promuevan el desarrollo de la cadena de suministro [79].

Ahora bien, el precio actual de la bioturbosina no sólo depende de su proceso productivo, sino que incluye el análisis y revisión de la cadena completa de suministro y su gestión eficiente. Existen pocos trabajos reportados al respecto, pero ninguno que considere la producción de hidrógeno renovable; este último es necesario para la producción de la bioturbosina, y posibilitaría disminuir su impacto ambiental [80]. En las últimas décadas se ha prestado atención a la minimización del impacto ambiental en las operaciones industriales a causa de regulaciones ambientales. Como resultado, la gestión de la cadena de suministro ha venido pasando de un enfoque específico, centrado en los costos, a un enfoque más amplio que busca la sostenibilidad de la cadena [81]. La importancia de equilibrar los objetivos sociales, ambientales y económicos en el desarrollo de las empresas ha creado una conciencia cada vez mayor sobre el diseño y planificación sostenible de las cadenas de suministro. En los últimos años, la investigación ha buscado ampliar los enfoques actuales en la gestión de la cadena de suministro para capturar estos objetivos, con el fin de garantizar la sostenibilidad a largo plazo [82].

De esta manera, la importancia que ha tenido la inclusión de múltiples objetivos en las cadenas de suministro y su optimización se puede observar en la literatura científica. Los artículos reportados presentan objetivos en los ámbitos técnico, ambiental, social y económico, los cuales se han resuelto mediante diferentes estrategias de optimización. Así, los trabajos referentes a la optimización de la cadena de suministros de biocombustibles se han estudiado principalmente para bioetanol y biodiésel [16, 82–84, 85]. En esos trabajos se desarrollan modelos mixto entero lineal (MILP) para la optimización de objetivos económicos y ambientales, tales como el valor presente neto, el valor económico de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, el total de emisiones de dióxido de carbono, así como el número de empleos que se generan de estas actividades. Con respecto a la bioturbosina los trabajos son más escasos, y aquellos relacionados se describen a continuación.

Moraes et al. [87] realizó un análisis económico para la producción de bioturbosina en Brasil, aunque no se trató de una estrategia de optimización, al igual que Köhler et al. [88], con alcance en países de la Unión Europea. Sin embargo, fue hasta 2017 que Domínguez-García et al. [88-89] propusieron una estrategia de planificación para la producción de bioturbosina mediante un modelo de optimización multi-objetivo MILP para la producción de bioturbosina. En ambos trabajos consideraron la producción de bioturbosina a partir de aceites vegetales de cultivos energéticos con el suministro de hidrógeno de origen fósil, para las rutas de procesamiento que lo requieren; en su último trabajo consideraron el uso de biomasa comestible como aceite de soya, además de la producción de hidrógeno convencional y renovable. En ambos trabajos se optimizaron objetivos económicos y ambientales. Asimismo, en 2018 Gregorio-Gutiérrez et al. [91] presentó en una modelo matemático MILP para optimización multi-objetivo de funciones ambientales y sociales de la optimización cadena de suministro para obtener bioturbosina a partir de *salicornia bigelovii* mediante la ruta de procesamiento Fischer-Tropsch.

2.5. Justificación

Con el propósito de reducir los gases de efecto invernadero (GEI) y la dependencia de la matriz energética en los combustibles fósiles, la Reforma Energética contempla, en una de sus vertientes, apoyar la producción y uso de biocombustibles. En este sentido, las acciones de política emprendidas por el gobierno mexicano en el último lustro tienen como objetivo la creación, fortalecimiento y desarrollo de sectores industriales para la producción de diferentes tipos de biocombustibles. La disponibilidad de biocombustibles permitirá contar con los recursos energéticos necesarios para el desarrollo económico de los diferentes sectores productivos; asimismo, permitirá coadyuvar a mitigar el problema del cambio climático.

En este contexto, la bioturbosina como combustible renovable tiene el potencial de contribuir con el desarrollo sostenible del sector de la aviación, reduciendo el impacto ambiental derivado de esta industria. De los procesos certificados por la ASTM para la producción de bioturbosina, el proceso de hidrotratamiento, desarrollado por UOP Honeywell, es el más maduro desde el punto de vista tecnológico; tanto por su versatilidad con el tipo de las materias primas que pueden emplearse como por su compatibilidad con las instalaciones de las refinerías existentes. Sin embargo, para que este biocombustible pueda estar disponible debe implementarse la cadena de suministro. Dicha cadena debe considerar a todos los actores involucrados, y debe determinarse su configuración óptima considerando objetivos económicos y ambientales. En el presente proyecto se determinará la cadena óptima de suministro para la producción de bioturbosina en México, mediante el procesamiento de aceites vegetales tanto para su producción como la generación de hidrógeno renovable. Los resultados posibilitarán coadyuvar al establecimiento de la cadena de suministro para la producción de bioturbosina en México.

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la cadena óptima de suministro para la producción de bioturbosina mediante programación matemática, considerando el hidrotreatmento de aceites vegetales no comestibles, así como la producción de hidrógeno renovable.

3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Modelar la producción de hidrógeno renovable a partir de aceites vegetales en el software Aspen Plus.
- Modelar la cadena de suministro en México para la producción de bioturbosina mediante el hidrotreatmento de aceites vegetales, incluyendo la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables y no renovables.
- Implementar en el software GAMS una estrategia de optimización basada en programación matemática para la solución de los modelos propuestos.
- Definir escenarios de optimización, considerando como objetivos la máxima utilidad, el mínimo impacto ambiental, así como la curva de Pareto.
- Analizar los resultados de los escenarios propuestos en términos de utilidades e impacto ambiental.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente investigación se plantea seguir la metodología descrita en este capítulo, que incluye el desarrollo de los modelos matemáticos para la cadena de suministro para la producción de bioturbosina, así como la definición de los escenarios de estudio. La metodología se describe a detalle a continuación.

4.1 Modelado de la cadena de suministro para la producción de bioturbosina mediante el hidrotreatmento de aceites vegetales.

Para realizar el modelado de la cadena suministro para la producción de bioturbosina se identificarán las materias primas potenciales, así como los sitios de cultivo en México. Con estos datos se realizará un modelado mediante balances de masa y energía para establecer las operaciones de procesamiento desde las materias primas hasta su distribución en la red de aeropuertos de México. Dicho modelado incluirá no solamente las ecuaciones de balance de masa y energía, sino también las restricciones asociadas a la máxima cantidad de tierra disponible, y producción máxima de bioturbosina a satisfacer. Se tomará como caso base el modelado de la cadena de suministro considerando la producción de hidrógeno a partir de fuentes no renovables, de acuerdo a lo propuesto por Domínguez-García et al. [90]. De manera puntual se obtendrá información relacionada con:

- Uso de la tierra para cultivos energéticos de segunda generación (aceites vegetales).
- Producción y logística de obtención de hidrógeno
- Producción de bioturbosina
- Ubicación de la(s) biorefinería(s)
- Logística y transporte de bioturbosina
- Ubicación de la red nacional de aeropuertos.

Con la información anteriormente mencionada se propondrá una superestructura para la producción de bioturbosina mediante la tecnología de hidrot ratamiento. En dicha superestructura se considerará la producción de hidrógeno renovable, a partir de la misma biomasa, así como de fuentes no renovables.

4.1.1 Superestructura

La Figura 5 presenta el conjunto de todas las posibles combinaciones entre sitios de cultivo de biomasa, la localización de las plantas de producción de hidrógeno renovable y bioturbosina, así como los mercados destino; también se muestran las rutas de procesamiento para la producción del hidrógeno renovable y de la bioturbosina, así como la red de transporte de materias primas, productos y subproductos.

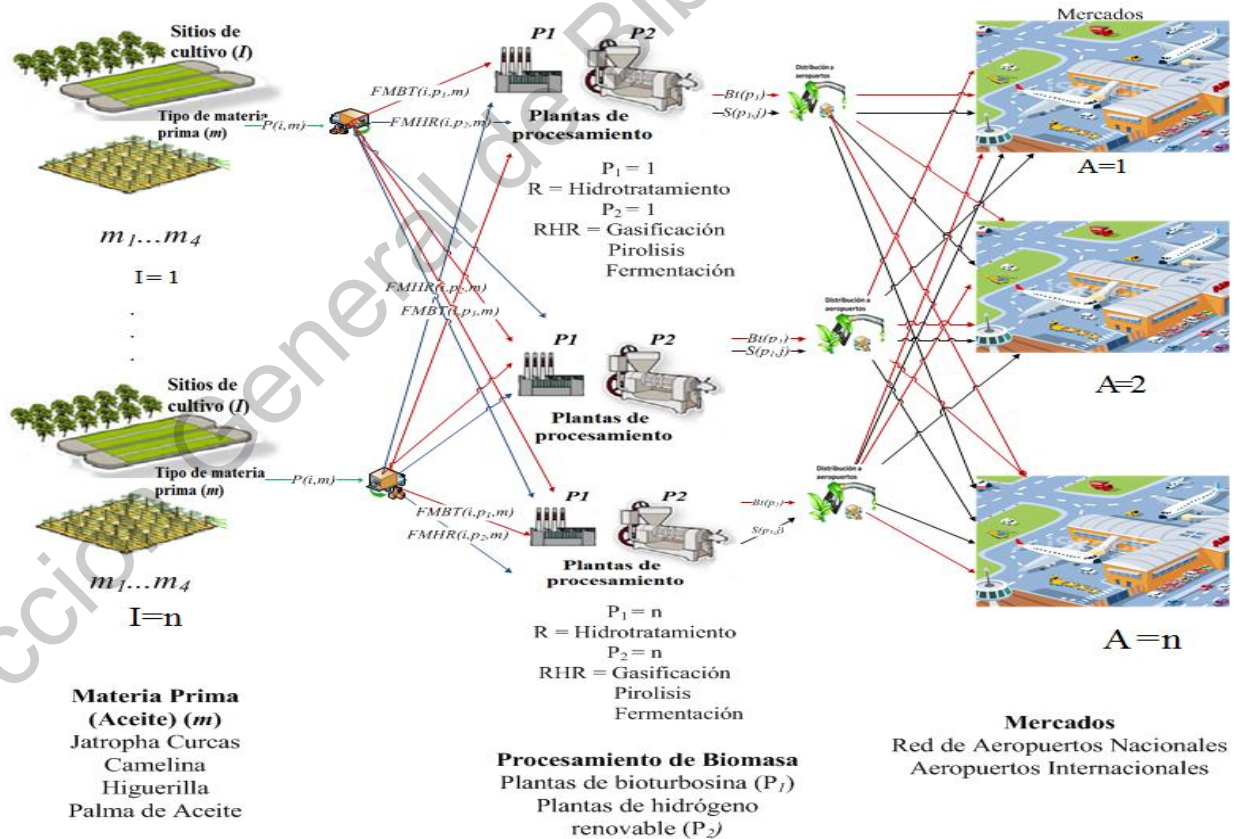


Figura 5. Superestructura de la cadena de suministro para la producción de bioturbosina

4.1.2 Modelo Matemático

El modelo matemático de la cadena de suministro que se empleó para determinar las soluciones óptimas considerando la mayor utilidad, las menores emisiones de CO₂, así como la curva Pareto considerando ambos objetivos. El caso de estudio fue el abastecimiento de bioturbosina en la red nacional de aeropuertos. Se consideró la tecnología de hidropcesamiento para la producción de bioturbosina. Para realizar la optimización de dicho modelo, se utilizó el método determinístico de restricciones de Épsilon basado en programación matemática multi-objetivo del tipo mixta-entera lineal.

Para lo anterior se planteó la siguiente representación matemática de la cadena de suministro, sujeto a un número de ecuaciones y restricciones explicados a continuación.

De acuerdo a las nomenclatura relacionada en la tabla siguiente.

Tabla 2. Nomenclatura

Codificación	Tipo de Variable	Descripción
PROFIT	Función Objetivo	Ganancia de producir bioturbosina
TOTALCO ₂	Función Objetivo	Total de emisiones de CO ₂
PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA (M)		
AC (I,M)	Variable Continua Positiva	Área total de cultivo usada
ANEW (I,M)	Variable Continua Positiva	Área nueva disponible para el cultivo de biomasa
PB(I,M)	Variable Continua Positiva	Producción de biomasa (m) en el sitio de cultivo (i)
FLUJOS MATERIA PRIMA (M)		
FMBT (I,P1,M)	Variable Continua Positiva	Flujo de biomasa (m) desde el sitio de cultivo (i) hasta la planta de bioturbosina (p ₁)
FMBTTOTAL (P1,M)	Variable Continua Positiva	Flujo total de materia prima (m) en la planta de bioturbosina (p ₁)
FMHR (I,P2,M)	Variable Continua Positiva	Flujo de biomasa (m) desde el sitio de cultivo (i) hasta la planta de hidrógeno renovable (p ₂)
FMHRTOTAL	Variable Continua Positiva	Flujo total de materia prima (m) en la planta de hidrógeno renovable (p ₂)
FLUJOS DE MATERIA PRIMA EN CADA RUTA DE PROCESO		
FMROUTE (P2,M,RHR)	Variable Continua Positiva	Flujo de biomasa (m) para cada ruta de procesamiento para producir hidrógeno renovable en la planta (p ₂)
FROUTE (P1,M,R)	Variable Continua Positiva	Flujo de biomasa (m) para cada ruta de procesamiento dentro de la planta de bioturbosina (p ₁)
PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS		
BP (P1)	Variable Continua Positiva	Bioturbosina producida por las diferentes plantas (p ₁)

BPD (P1,A)	Variable Continua Positiva	Bioturbosina producida en las diferentes plantas (p_1) y distribuida a los mercados
PHR (P2)	Variable Continua Positiva	Hidrógeno renovable producido en la planta (p_2)
S (P1,J)	Variable Continua Positiva	Flujo de subproducto (j) producido en la planta (p_1)
FLUJOS DE HIDROGENO RENOVABLE		
FHRB (P2,P1)	Variable Continua Positiva	Flujo de hidrógeno renovable desde la planta de producción (p_2) hasta la planta (p_1)
BR (P1)	Variable Continua Positiva	Cantidad de hidrógeno renovable consumido en la planta (p_1)
HRB (P1)	Variable Continua Positiva	Hidrógeno renovable que llega a cada planta de bioturbosina
HRTOTAL (P1)	Variable Continua Positiva	Flujo de hidrógeno renovable total que llega a cada planta (p_1)
CAPACIDAD DE LAS PLANTAS		
FINSTALLED (P1,M,R)	Variable Continua Positiva	Capacidad instalada en la planta (p_1) para procesar materia prima (m) en a través de la ruta (r)
FMINSTALLED (P2,M,RHR)	Variable Continua Positiva	Capacidad instalada en la planta (p_2) para procesar la materia prima (m) a través de la ruta (thr)
COSTOS DE TRANSPORTE		
CTB	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de bioturbosina a los mercados
CTBE	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de bioturbosina exportada
CTBI	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de bioturbosina importada
CTHRB	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de hidrógeno renovable enviado a las plantas de bioturbosina
CTMB	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de biomasa a las plantas (p_1)
CTMHR	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de biomasa a las plantas de hidrógeno renovable (p_2)
CTS	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de subproductos a los mercados
CTSE	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de subproductos exportados
CTSI	Variable Continua Positiva	Costo de transporte de subproductos importados
COSTOS DE CAPITAL		
CCB	Variable Continua Positiva	Costo de capital de instalación de las plantas de bioturbosina
CCHR	Variable Continua Positiva	Costo de capital de instalación de las plantas de hidrógeno renovable
COSTOS DE PROCESAMIENTO		
COSTPROCESSINGBJF	Variable Continua Positiva	Costo de procesamiento de la biomasa para la producción de bioturbosina
COSTPROCESSINGHR	Variable Continua Positiva	Costo de procesamiento de la biomasa para la producción de hidrógeno renovable
COSTOS TOTALES		
CAPCOST	Variable Continua Positiva	Costo total de capital
COSTFEEDSTOCK	Variable Continua Positiva	Costo total materia prima
COSTTRANSPORTTOTAL	Variable Continua Positiva	Costo total de transporte
COSTPROCESSINGTOTAL	Variable Continua Positiva	Costo total de procesamiento
FLUJO A LOS MERCADOS		
FBI (P1)	Variable Continua Positiva	Flujo de bioturbosina enviada al mercado internacional
FBIN (A)	Variable Continua Positiva	Flujo de bioturbosina importada (a)
FSIN (J,A)	Variable Continua Positiva	Flujo de subproducto (j) desde el mercado internacional al mercado nacional (importaciones)
FSNI (J,P1)	Variable Continua Positiva	Flujo del subproducto (j) desde la planta (p_1) hasta el mercado internacional (exportaciones)

BTI	Variable Continua Positiva	Bioturbosina enviada al mercado internacional (exportada)
BTN (P1,A)	Variable Continua Positiva	Flujo de bioturbosina en los diferentes mercados (a)
BTNA (A)	Variable Continua Positiva	Bioturbosina enviada a los mercados nacionales
SI (J)	Variable Continua Positiva	Flujo de subproducto (j) enviado al mercado internacional
Ss (P1,J,A)	Variable Continua Positiva	Flujo de subproducto (j) de la planta (p1) hasta el mercado (a)
TS (J,A)	Variable Continua Positiva	Total de subproducto (j) en los diferentes mercados (a)
VENTAS Y COMPRAS		
DOMESTICSALES	Variable Continua Positiva	Ventas al mercado nacional
IMPORTCOST	Variable Continua Positiva	Costo total de la bioturbosina y subproductos importados
INTERNATIONSALES	Variable Continua Positiva	Ventas al mercado internacional
TOTALSALES	Variable Continua Positiva	Ventas totales
EMISIONES DE CO₂		
BTCO ₂	Variable Continua Positiva	Producción de CO ₂ por consumo bioturbosina
CMPCO ₂	Variable Continua Positiva	Captación de CO ₂ por cultivo de materia prima
PMPCO ₂	Variable Continua Positiva	Producción de CO ₂ por procesamiento de materia prima
SPCO ₂	Variable Continua Positiva	Producción de CO ₂ por consumo de subproductos
TBTCO ₂	Variable Continua Positiva	Producción CO ₂ por transporte de bioturbosina
THRCO ₂	Variable Continua Positiva	Producción de CO ₂ por transporte de hidrógeno renovable
TMPCO ₂	Variable Continua Positiva	Producción de CO ₂ por transporte de materia prima
TSPCO ₂	Variable Continua Positiva	Producción de CO ₂ por transporte de subproductos
ACTIVACIÓN DE COSTOS		
BVBY	Variable Binaria	Activación de costo capital en la producción de bioturbosina
BVBZ	Variable Binaria	Activación del costo de capital de la ruta de proceso en las plantas bioturbosina
BVHRW	Variable Binaria	Activación del costo de capital para dimensionar las plantas de hidrógeno renovable
BVHRX	Variable Binaria	Activación del costo de capital de la ruta de proceso en las plantas de hidrógeno renovable

Disponibilidad de la tierra para el cultivo.

El área total utilizada ($A_{i,m}$) para el cultivo de los tipos de biomasa (m) en el sitio (i) es igual a la suma de la superficie existente utilizada para el cultivo ($A_{i,m}^{exist}$), además de la nueva área disponible ($A_{i,m}^{New}$), necesaria para producir la demanda de biomasa en cada biorefinería y planta de hidrógeno renovable.

$$A_{i,m} = A_{i,m}^{exist} + A_{i,m}^{New}, \forall i \in I, m \in M \quad (1)$$

Balances de masa para la producción de biomasa

La producción de biomasa (semillas) ($P_{i,m}$) en los sitios de cultivo (i) de la biomasa (m) depende del factor de rendimiento en cada sitio ($\beta_{i,m}$) y el área utilizada para el cultivo ($A_{i,m}$).

$$P_{i,m} = \beta_{i,m}A_{i,m}, \forall i \in I, m \in M \quad (2)$$

El factor de rendimiento para la biomasa ($\beta_{i,m}$) está determinado por las condiciones ambientales y la composición de la tierra de cada uno de los estados mexicanos.

La distribución de la biomasa ($P_{i,m}$) es igual a la suma de las biomásas enviadas a las plantas de bioturbosina ($FMBT_{i,p1,m}$) así como aquella enviada a las plantas de hidrógeno renovable ($FMHR_{i,p2,m}$):

$$P_{i,m} = \sum_{i1} FMBT_{i,p1,m} + \sum_{i2} FMHR_{i,p2,m}, \forall i \in I, m \in M \quad (3)$$

Balances de masa para producción y distribución de hidrógeno renovable.

El flujo de biomasa para la producción hidrógeno ($FMHR_{total_{p2,m}}$), es igual a la sumatoria de los flujos de materia prima ($FMBH_{total_{p2,m}}$) entregada a cada planta de producción (P_2).

$$FMHR_{total_{p2,m}} = \sum_i FMBH_{i,p2,m}, \forall p2 \in P2, m \in M \quad (4)$$

El total de biomasa procesada en cada planta para producir hidrógeno renovable ($FMHR_{total_{p2,m}}$) es igual a la sumatoria de la biomasa procesada en cada ruta ($fm_{p2,m,rhr}^{route}$) para producir hidrógeno.

$$FMHR_{total_{p2,m}} = \sum_{rhr} fm_{p2,m,rhr}^{route}, \forall p2 \in P2, m \in M \quad (5)$$

La cantidad de hidrógeno renovable producida en cada planta (PHR_{p2}) es igual a la suma de la biomasa procesada ($fm_{p2,m,rhr}^{route}$) multiplicada por un factor de conversión de la biomasa a hidrógeno ($\gamma_{p2,m,rhr}$):

$$PHR_{p2} = \sum_m \sum_{rhr} fm_{p2,m,rhr}^{route} \gamma_{p2,m,rhr}, \forall p2 \in P2 \quad (6)$$

El total de hidrógeno producido en cada una de las plantas ($p2$) es igual a la suma del flujo de hidrógeno renovable enviado cada una de las plantas de producción de bioturbosina:

$$PHR_{p2} = \sum_{p1} FHRB_{p2,p1}, \forall p2 \in P2 \quad (7)$$

El total de hidrógeno producido es distribuido a cada una de las plantas de bioturbosina (HRB_{p1}) es igual a la suma del flujo de hidrógeno renovable producido en la planta ($P2$) y suministrado cada una de las plantas de producción de bioturbosina.

$$HRB_{p1} = \sum_{p2} FHRB_{p2,p1}, \forall p1 \in P1 \quad (8)$$

El total del hidrógeno que llega a cada planta de bioturbosina ($HRtotal_{p1}$) debe ser consumido para evitar la acumulación y es igual a la suma de todos los flujos de la biomasa transformada en bioturbosina ($f_{m,r,p1}^{route}$) multiplicado por un factor de conversión de biomasa a biocombustible ($\phi_{m,r}$) y un coeficiente estequiométrico de conversión de hidrogeno a bioturbosina ($v_{m,r,p1}$).

$$HRtotal_{p1} = \sum_m \sum_r v_{m,r,p1} f_{m,r,p1}^{route} \phi_{m,r}, \forall p1 \in P1 \quad (9)$$

Balances de masa para la producción y distribución de bioturbosina.

La biomasa total enviada a cada una de las plantas de bioturbosina ($FMBT_{total_{p1,m}}$) es igual a la suma de todos los flujos de biomasa ($FMBT_{i,p1,m}$) enviada a la planta de procesamiento para producir bioturbosina.

$$FMBT_{total_{p1,m}} = \sum_i FMBT_{i,p1,m}, \forall p1 \in P1, m \in M \quad (10)$$

El total de biomasa procesada en cada planta de bioturbosina ($FMBT_{total_{p1,m}}$) es igual a la suma de la toda la biomasa procesada en cada ruta de procesamiento para producir bioturbosina ($f_{m,r,p1}^{route}$).

$$FMBT_{total_{p1,m}} = \sum_r f_{m,r,p1}^{route}, \forall p1 \in P1, m \in M \quad (11)$$

La cantidad de bioturbosina producida (B_{p1}) es igual a la suma de todo el tipo de biomasa procesada en la planta de hidrotatamiento para producir biocombustible ($f_{m,r,p1}^{route}$) multiplicado por un factor de conversión de la biomasa a bioturbosina ($\phi_{m,r}$).

$$B_{p1} = \sum_m \sum_r f_{m,r,p1}^{route} \phi_{m,r}, \forall p1 \in P1 \quad (12)$$

Los flujos de bioturbosina producidos en cada planta de producción (B_{p1}) son la suma de todos los flujos de bioturbosina enviados y distribuidos al mercado nacional ($b_{p1,a}$) y mercado internacional ($FBNI_{p1}$).

$$B_{p1} = \sum_a b_{p1,a} + FBNI_{p1}, \forall p1 \in P1 \quad (13)$$

Balance de masa para la producción y distribución de subproductos.

La cantidad de subproducto (J) producido en cada una de las plantas de bioturbosina ($S_{p1,j}$) es igual a la suma de toda la biomasa procesada en las plantas

(p_1) utilizada para producir subproductos (f_{m,r,p_1}^{route}) multiplicado por un factor de conversión de la biomasa a cada tipo de subproducto ($\alpha_{m,r,j}$).

$$S_{p_1,j} = \sum_m \sum_r f_{m,r,p_1}^{route} \alpha_{m,r,j}, \forall p_1 \in P1, j \in J \quad (14)$$

La distribución de los subproductos producidos ($S_{p_1,j}$) es igual a la suma de los flujos de subproducto (J) enviados y distribuidos al mercado nacional ($SS_{p_1,j,a}$) y mercado internacional ($FSNI_{p_1,j}$).

$$S_{p_1,j} = \sum_a SS_{p_1,j,a} + FSNI_{p_1,j}, \forall p_1 \in P1, j \in J \quad (15)$$

Balance de bioturbosina en los mercados

La cantidad de bioturbosina distribuida en el mercado nacional (BTN_a) es igual a la suma de los flujos de bioturbosina enviados desde las plantas de bioturbosina ($b_{p_1,a}$) más los flujos de la bioturbosina importada desde el exterior.

$$BTN_a = \sum_{p_1} b_{p_1,a} + FBIN_a, \forall a \in A \quad (16)$$

La cantidad de bioturbosina enviada al mercado internacional (BTI_{total}) es igual a la suma de todos los excedentes de bioturbosina producidos en cada planta (p_1) y que es enviada al mercado internacional (FBI_{p_1}).

$$BTI_{total} = \sum_{p_1} FBI_{p_1} \quad (17)$$

Balance de subproductos en los mercados.

Los subproductos, recibidos en el mercado nacional ($TS_{j,a}$) es igual a la suma de las cantidades de subproductos procedentes de cada una de las plantas de bioturbosina ($SS_{i_1,j,a}$) más la cantidad de subproductos importados ($FSIN_{j,a}$).

$$TS_{j,a} = \sum_{p1} Ss_{p1,j,a} + FSIN_{j,a}, \forall a \in A, j \in J \quad (18)$$

La cantidad de subproducto (j) enviado al mercado internacional (SI_j) es igual a la suma de todas las cantidades excedentes de subproducto enviados desde cada planta de bioturbosina al mercado internacional ($FSNI_{j,p1}$).

$$SI_j = \sum_{p1} FSNI_{j,p1}, \forall j \in J \quad (19)$$

Restricciones

Este modelo está sujeto a las siguientes restricciones.

Restricción de área.

El área utilizada para la producción de biomasa ($A_{i,m}$) está limitada por el área máxima disponible ($A_{i,m}^{max}$), lo que implica que sólo es posible considerar un área limitada de tierra para el cultivo de biomasa (m) sin que tenga consecuencias de impacto ambiental, por uso de suelo y recursos naturales como agua.

$$A_{i,m} \leq A_{i,m}^{max}, \forall i \in I, m \in M \quad (20)$$

Restricción de la demanda de bioturbosina

La cantidad de bioturbosina recibida en el mercado nacional (BTN_a) debe ser menor o igual que el total de la demanda de este biocombustible en el mercado nacional (DB_a).

$$BTN_a \leq DB_a, \forall a \in A \quad (21)$$

La cantidad de bioturbosina recibida en el mercado Internacional (BTI_{p1}) debe ser menor o igual que el total de los excedentes de este biocombustible en cada planta de bioturbosina (DB_{p1}).

$$BTI_{p1} \leq DB_{p1}, \forall p1 \in P1 \quad (22)$$

La cantidad de subproducto (j) recibido en el mercado nacional ($TS_{j,a}$) debe ser menor o igual que la demanda total máxima de subproducto en el mercado nacional ($DS_{j,a}^{max}$).

$$TS_{j,a} \leq DS_{j,a}^{max}, \forall j \in J, a \in A \quad (23)$$

Restricciones de la capacidad de procesamiento de las plantas.

Las variables binarias para la activación de las plantas de bioturbosina (p_1) se identifican con la letra (y,z). La capacidad de cualquier planta p_1 para producir bioturbosina (B_{p1}) debe ser mayor o igual a la capacidad mínima de producción del biocombustible (B_{p1}^{min}); y menor o igual a la capacidad máxima de producción del biocombustible (B_{p1}^{max}). La variable binaria (y_{p1}) se utiliza para asociar el costo de capital con la dimensión de la planta de bioturbosina.

$$B_{p1}^{min} y_{p1} \leq B_{p1} \leq B_{p1}^{max} y_{p1}, \forall p1 \in P1 \quad (24)$$

La capacidad de cualquier ruta de procesamiento en cada una de las plantas de bioturbosina ($f_{p1,m,r}^{route}$) tiene que ser mayor o igual a la mínima capacidad de procesamiento de las biomasa por ruta ($f_{p1,m,r}^{route min}$) y menor o igual a la capacidad máxima de procesamiento de las biomasa por ruta ($f_{p1,m,r}^{route max}$). La variable binaria ($z_{p1,m,r}$) se utiliza para asociar el costo de capital con la capacidad de procesamiento de la biomasa en la planta de bioturbosina.

$$f_{p1,m,r}^{route min} z_{p1,m,r} \leq f_{p1,m,r}^{route} \leq f_{p1,m,r}^{route max} z_{p1,m,r}, \forall p1 \in P1, m \in M, r \in R \quad (25)$$

Las variables binarias para activar las plantas de producción de hidrógeno renovable (p_2) son (w, x). La capacidad de cualquier planta p_2 (PHR_{p_2}) tiene que ser mayor o igual que la capacidad mínima de producción de hidrógeno renovable ($PHR_{p_2}^{min}$), y menor o igual a la capacidad máxima de producción de hidrógeno renovable ($PHR_{p_2}^{max}$). La variable binaria (w_{p_2}) se utiliza para asociar el costo de capital de la dimensión de producción de la planta de hidrógeno renovable.

$$PHR_{p_2}^{min} w_{p_2} \leq PHR_{p_2} \leq PHR_{p_2}^{max} w_{p_2}, \forall p_2 \in P_2 \quad (26)$$

La capacidad de cualquier ruta de procesamiento en cada planta de hidrógeno renovable ($f_{p_2,m,rhr}^{route}$) tiene que ser mayor o igual a la mínima capacidad de procesamiento de biomasa por ruta ($f_{p_2,m,rhr}^{route min}$), y menor o igual a la capacidad de procesamiento de máxima de biomasa por ruta ($f_{p_2,m,rhr}^{route max}$). La variable binaria ($x_{p_2,m,rhr}$) se utiliza para asociar el costo de capital de la dimensión de procesamiento de la planta de hidrógeno renovable.

$$f_{p_2,m,rhr}^{route min} x_{p_2,m,rhr} \leq f_{p_2,m,rhr}^{route} \leq f_{p_2,m,rhr}^{route max} x_{p_2,m,rhr}, \forall p_2 \in P_2, m \in M, rhr \in RHR \quad (27)$$

Costos

El costo de materia prima ($Cost^{feedstock}$) es igual a la suma de toda la biomasa producida ($P_{i,m}$) multiplicada por el costo unitario de cada tipo de biomasa ($UC_{i,m}^{feedstock}$):

$$Cost^{feedstock} = \sum_i \sum_m P_{i,m} UC_{i,m}^{feedstock} \quad (28)$$

El costo de procesamiento de la biomasa para la producción de bioturbosina ($Cost_{biojet fuel}^{Processing}$) es igual a la suma de la biomasa procesada por hidrotratamiento ($f_{p_1,m,r}^{route}$) multiplicado por el costo unitario de procesamiento ($UC_{p_1,m,r}^{Processing}$).

$$Cost_{biojet\ fuel}^{Processing} = \sum_{p1} \sum_m \sum_r f_{p1,m,r}^{route} UCbt_{p1,m,r}^{Processing} \quad (29)$$

El costo de procesamiento de la biomasa para la producción de hidrógeno renovable. ($Cost_{hydrogen\ Renew}^{Processing}$) es igual a la suma de la biomasa procesada por cada ruta ($f_{p2,m,rhr}^{route}$) multiplicado por el costo unitario del procesamiento del hidrógeno renovable ($UCbt_{p2,m,rhr}^{Processing}$).

$$Cost_{hydrogen\ Renew}^{Processing} = \sum_{p2} \sum_m \sum_r f_{p2,m,rhr}^{route} UCbt_{p2,m,rhr}^{Processing} \quad (30)$$

El costo total de procesamiento de la biomasa ($Cost_{total}^{Processing}$) es igual a la suma del costo del procesamiento de biomasa para la producción de hidrógeno renovable más el costo de procesamiento de la bioturbosina.

$$Cost_{total}^{Processing} = Cost_{bhydrogen\ Renew}^{Processing} + Cost_{biojet\ fuel}^{Processing} \quad (31)$$

El costo del transporte de la biomasa para plantas de bioturbosina (CTMB) es igual a la suma de la biomasa enviada a cada una de las plantas de bioturbosina ($FMBT_{i,p1,m}$) multiplicada por el costo unitario del transporte entre el cultivo y las plantas de procesamiento de la biomasa para bioturbosina ($UCTMB_{i,m,p1}$).

$$CTMB = \sum_i \sum_{p1} \sum_m FMBT_{i,p1,m} UCTMB_{i,m,p1} \quad (32)$$

El costo del transporte de biomasa a las plantas de producción de hidrógeno (CTMHR) es igual a la suma de la biomasa enviada a las plantas de producción de hidrógeno ($FMHR_{i,p2,m}$) multiplicada por el costo unitario de transporte entre el sitio de cultivo y las plantas de producción de hidrógeno renovable ($UCTMH_{i,m,p2}$).

$$CTMHR = \sum_i \sum_{p2} \sum_m FMHR_{i,p2,m} UCTMH_{i,m,p2} \quad (33)$$

El costo del transporte para la bioturbosina enviada al mercado nacional (CTB) es igual a la suma de la bioturbosina enviada al mercado nacional ($btn_{p1,a}$) multiplicada por el costo unitario de transporte entre el sitio donde está la planta de producción del biocombustible y el mercado destino ($UCTBTN_{p1,a}$).

$$CTB = \sum_{p1} \sum_a btn_{p1,a} UCTBTN_{p1,a} \quad (34)$$

El costo del transporte para los subproductos enviados al mercado nacional (CTS) es igual a la suma de los subproductos enviado al mercado nacional ($Ss_{p1,j,a}$) multiplicados por el costo unitario del transporte entre el sitio de la instalación de las plantas de producción de los subproductos (p_1) y el mercado final de consumo ($UCTS_{p1,j,a}$).

$$CTS = \sum_{p1} \sum_j \sum_a Ss_{p1,j,a} UCTS_{p1,j,a} \quad (35)$$

El costo del transporte para la bioturbosina importada (CTBI) es igual a la suma de la bioturbosina traída del mercado internacional ($fbin_a$) multiplicada por el costo unitario de transporte entre el sitio donde se compró y el mercado nacional destino ($UCTBI_a$).

$$CTBI = \sum_a fbin_a UCTBI_a \quad (36)$$

El costo del transporte para los subproductos importados (CTSI) es igual a la suma de los subproductos adquiridos desde el mercado internacional ($FSIN_{j,a}$) multiplicados por el costo unitario del transporte entre el sitio adquisición del subproducto y el mercado nacional de consumo ($UCTSI_{j,a}$).

$$CTSI = \sum_j \sum_a FSIN_{j,a} UCTSI_{j,a} \quad (37)$$

El costo del transporte para la bioturbosina enviada al mercado internacional - exportada (CTBE) es igual a la suma de la bioturbosina enviada al mercado internacional (fb_{i,p_1}) multiplicada por el costo unitario de transporte entre el sitio donde está la planta de producción del biocombustible y el mercado internacional destino ($UCTBE_{p_1}$).

$$CTBE = \sum_{p_1} fb_{i,p_1} UCTBE_{p_1} \quad (38)$$

El costo del transporte para los subproductos enviados al mercado internacional (CTSE) es igual a la suma de los subproductos enviados al mercado internacional ($FSNI_{j,p_1}$) multiplicados por el costo unitario del transporte entre el sitio de la instalación de la planta de producción de los subproductos (p_1) y el mercado internacional de su consumo ($UCTSE_{j,p_1}$).

$$CTSE = \sum_j \sum_{p_1} FSNI_{j,p_1} UCTSE_{j,p_1} \quad (39)$$

El costo de transporte del hidrógeno renovable a las plantas de bioturbosina (CTHRB) es igual a la suma de los flujos de hidrógeno renovable enviados a las plantas de bioturbosina ($FHRB_{p_2,p_1}$) multiplicado por el costo unitario de transporte desde la planta de hidrógeno hasta la planta P_1 ($UCTBHB_{p_2,p_1}$)

$$CTHRB = \sum_{p_2} \sum_{p_1} FHRB_{p_2,p_1} UCTBHB_{p_2,p_1} \quad (40)$$

El total de costos de transporte ($Cost_{total}^{transport}$) es igual a la suma de todos los costos de transportes de la biomasa, tanto para la producción de hidrógeno como de bioturbosina, y productos terminados, hidrógeno renovable, bioturbosina y subproductos, como sigue:

$$Cost_{total}^{transport} = CTMB + CTMH + CTB + CTS + CTBI + CTSI + CTBE + CTSE + CTHRB \quad (41)$$

El costo de capital de la instalación de las plantas de bioturbosina (CCB) es igual a la suma del costo base de instalación de la planta (CB_{p1}^B), multiplicado por las variables binarias de activación (y_{p1}) de la planta de bioturbosina, más la suma del costo base de instalación de cada ruta de procesamiento en las plantas de bioturbosina ($CR_{p1,m,r}^B$), multiplicado las variables binarias de activación para cada ruta de procesamiento ($z_{p1,m,r}$), más la suma de la materia prima transformada para producir bioturbosina ($f_{p1,m,r}^{route}$) multiplicado por un parámetro de dimensionamiento de la planta ($CD_{p1,m,r}^B$).

$$CCB = \sum_{p1} CB_{p1}^B y_{p1} + \sum_{p1} \sum_m \sum_r CR_{p1,m,r}^B z_{p1,m,r} + \sum_{i1} \sum_m \sum_r CD_{p1,m,r}^B f_{p1,m,r}^{route} \quad (42)$$

El costo de capital para la instalación de las plantas de producción hidrógeno renovable (CCHR) es igual a la suma del costo base de instalación (CB_{p2}^{HR}) multiplicado por las variables binarias de activación de la planta de hidrógeno renovable (w_{p2}), más la suma del costo de la base de instalación de cada ruta dentro de la planta $P_2(CR_{p2,m,rhr}^{BR})$ multiplicado por las variables binarias de activación para cada ruta de procesamiento ($x_{p2,m,rhr}$), más la suma de la materia prima transformada para producir hidrógeno renovable ($f_{p2,m,rhr}^{route}$) multiplicado por un parámetro de dimensionamiento de la planta ($CD_{p2,m,rhr}^{HR}$).

$$CCHR = \sum_{p2} CB_{p2}^{HR} w_{p2} + \sum_{p2} \sum_m \sum_{rhr} CR_{p2,m,rhr}^{BR} x_{p2,m,rhr} + \sum_{p2} \sum_m \sum_r CD_{p2,m,rhr}^{HR} f_{p2,m,rhr}^{route} \quad (43)$$

El costo de total de capital (CapCost) es igual a la suma de los costos de capital para la instalación de plantas de producción de bioturbosina (P_1) y de hidrógeno renovable (P_2), como sigue:

$$CapCost = CCB + CCHR \quad (44)$$

El costo total de importación (*ImportCost*) es igual a la suma de los flujos de bioturbosina importados ($fbin_a$) multiplicados por el costo unitario del biocombustible en el mercado ($UCBI_a$), más la suma de los flujos de subproductos importados ($FSIN_{j,a}$) multiplicados por el costo unitario de los subproductos en el mercado internacional ($UCSI_j$).

$$ImportCost = \sum_a fbin_a UCBI_a + \sum_j \sum_a FSIN_{j,a} UCSI_j \quad (45)$$

Ventas.

Las ventas en el mercado nacional (Domestic Sales) son el resultado de la suma de las cantidades de bioturbosina distribuidas en el mercado nacional de todas las plantas ($btn_{p1,a}$), multiplicado por el precio nacional de la bioturbosina ($UC_a^{biojet\ fuel}$) más la suma de los montos de las ventas de los subproductos, distribuidos en el mercado nacional procedentes de todas las plantas P_1 ($Ss_{p1,j,a}$) multiplicado por el precio nacional de los subproductos ($UC_{j,a}^{byproduct}$) como sigue:

$$Domestic\ Sales = (\sum_{p1} \sum_a btn_{p1,a}) UC_a^{biojet\ fuel} + (\sum_{p1} \sum_j \sum_a Ss_{p1,j,a}) UC_{j,a}^{byproduct} \quad (46)$$

Las ventas internacionales (International Sales) son el resultado de la suma de las cantidades de bioturbosina distribuidas al mercado internacional desde todas las plantas de producción (FBI_{p1}) multiplicado por el precio internacional de la bioturbosina ($UCBI$), además de la suma de las cantidades de subproductos distribuidos al mercado internacional desde todas las plantas P_1 ($FSNI_{j,p1}$) multiplicado por el precio internacional de los subproductos ($UCSI_j$) como sigue:

$$International\ Sales = (\sum_{p1} FBI_{p1}) UCBI + \sum_j \sum_{p1} FSNI_{j,p1} UCSI_j \quad (47)$$

El total de ventas (*TotalSales*) es igual a la suma de las ventas nacionales más las ventas internacionales como sigue.

$$TotalSales = DomesticSales + InternationalSales \quad (48)$$

Función objetivo de ganancia total.

Las ganancias totales (beneficio global) son la cantidad total de ventas menos los costos involucrados en la cadena de suministro para la producción de bioturbosina, el hidrógeno renovable y los subproductos como sigue:

$$Profit = Totalsales - Cost^{feedstock} - Cost_{total}^{processing} - Cost_{total}^{transport} - CapCost - ImportCost \quad (49)$$

Captura de emisiones de dióxido de carbono CO₂.

El CO₂ capturado en los campos de cultivo (CMPCO₂) es igual a la suma de las áreas de cultivo ($A_{i,m}$) multiplicado por el factor de conversión para producir biomasa ($\beta_{i,m}$) y el parámetro de captura del dióxido de carbono por tipo de cultivo ($CMP_{i,m}$).

$$CMPCO_2 = \sum_i \sum_m A_{i,m} CMP_{i,m} \beta_{i,m} \quad (50)$$

El CO₂ liberado por el transporte de materias primas (TMPCO₂) es igual a la suma de toda la biomasa transportada a todas las plantas de bioturbosina de todos los sitios de cultivo ($FMBT_{i,p1,m}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TMPB_{i,p1,m}$), más la suma de la biomasa transportada a todas las plantas de producción de hidrógeno renovable desde todos los sitios de cultivo ($FMHR_{i,p2,m}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TMPHR_{i,p2,m}$), como sigue:

$$TMPCO_2 = \sum_i \sum_{p1} \sum_m FMBT_{i,p1,m} TMPB_{i,p1,m} + \sum_i \sum_{p2} \sum_m FMHR_{i,p2,m} TMPHR_{i,p2,m} \quad (51)$$

El CO₂ liberado por el transporte del hidrógeno renovable (THRCO₂) es igual a la suma de todos los flujos de hidrógeno renovable transportados a todas las plantas de producción de bioturbosina ($FHRB_{p2,p1}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TBT_{p1,a}$)

$$THRCO_2 = \sum_{p2} \sum_{p1} FHRB_{p2,p1} TBT_{p1,a} \quad (52)$$

El CO₂ liberado por el transporte de la bioturbosina (TBTCO₂) es igual a la suma de todos los flujos de bioturbosina transportados a todos los mercados nacionales desde todas las plantas de producción ($btn_{p1,a}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TBT_{p1,a}$), más la suma de la bioturbosina exportada transportada del mercado nacional al internacional (FBI_{p1}) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TBEI_{p1}$), más la suma de la bioturbosina importada transportada del mercado internacional al nacional ($FBIN_a$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TBIN_{p1}$).

$$TBTCO_2 = \sum_{p1} \sum_a btn_{p1,a} TBT_{p1,a} + \sum_{p1} FBI_{i1} TBEI_{p1} + \sum_a FBIN_a TBIN_{p1} \quad (53)$$

El CO₂ liberado para el transporte de subproductos (TSPCO₂) es igual a la suma de los subproductos transportados al mercado nacional desde las plantas de bioturbosina ($SS_{p1,j,a}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TSP_{p1,j,a}$), más la suma de los subproductos exportados transportados desde el mercado nacional al mercado internacional ($FSIN_{j,a}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TSIN_{j,a}$), más la suma de los subproductos Importados al mercado nacional desde el mercado internacional ($FSNI_{j,p1}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TSNI_{j,p1}$).

$$TSPCO_2 = \sum_{p1} \sum_j \sum_a SS_{p1,j,a} TSP_{p1,j,a} + \sum_j \sum_a FSIN_{j,a} TSIN_{j,a} + \sum_j \sum_{p1} FSNI_{j,p1} TSNI_{j,p1} \quad (54)$$

El CO₂ liberado en el procesamiento de biomasa (PMPCO₂) es igual a la suma de los flujos de biomasa procesados en las plantas de bioturbosina ($f_{p1,m,r}^{route}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($PMP_{p1,m,r}$), más la suma de los flujos de biomasa procesados en las plantas de hidrógeno renovable ($f_{p2,m,rhr}^{route}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($PMHR_{p2,m,rhr}$).

$$PMPCO_2 = \sum_{p1} \sum_m \sum_r f_{p1,m,r}^{route} PMP_{p1,m,r} + \sum_{p2} \sum_m \sum_{rhr} f_{p2,m,rhr}^{route} PMHR_{p2,m,rhr} \quad (55)$$

El CO₂ liberado por el consumo de la bioturbosina (BTCO₂) es igual a la suma de la bioturbosina distribuida en el mercado nacional (btn_a) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($BTPC_a$), más la suma de la bioturbosina distribuida en el mercado internacional (BTI) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($TBMI$).

$$BTCO_2 = \sum_a BTN_a BTPC_a + (BTI)(TBMI) \quad (56)$$

El CO₂ liberado por el consumo de subproductos (SPCO₂) es igual a la suma de los subproductos distribuidos en el mercado nacional ($TS_{j,a}$) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ ($BTPC_a$), más la suma de los subproductos distribuidos en el mercado internacional (SI_j) multiplicado por un parámetro de emisiones de CO₂ (SSP_j).

$$SPCO_2 = \sum_a \sum_j TS_{j,a} SP_{j,a} + \sum_j SI_j SSP_j \quad (57)$$

Función objetivo de emisiones de CO₂.

El CO₂ total liberado (TOTALCO₂) es igual a la suma de todas las emisiones producidas y liberadas por el transporte, procesamiento de materias primas y el consumo de productos menos el dióxido de carbono capturado en los campos de cultivo.

$$TOTALCO_2 = TMPCO_2 + THRCO_2 + TBTCO_2 + TSPCO_2 + PMPCO_2 + BTCO_2 + SPCO_2 - CMPCO_2 \quad (58)$$

De esta forma, el problema de optimización implica maximizar la ganancia (dada en la ecuación (49)) y minimizar la cantidad de emisiones (dada en la ecuación (58)), sujeto al resto de las ecuaciones; este conjunto de ecuaciones representa un problema multi-objetivo mixto-entero lineal (MILP). Asimismo, para resolver este problema multi-objetivo, se aplica el método de escalarización de restricción ϵ , que implica la formulación de un modelo mono-objetivo relacionado con el modelo multi-objetivo por medio de un escalar. Debe ser notado que una de las principales limitaciones de la formulación propuesta está asociada a la disponibilidad de parámetros actualizados.

4.2 Modelado de la producción de hidrógeno renovable mediante el craqueo de aceites vegetales en el software Aspen Plus.

Se modelará en el software Aspen Plus la producción de hidrógeno renovable mediante el craqueo de aceite vegetales. Para ello se considerarán los parámetros termodinámicos de los principales componentes del aceite reportados por [92]. Dichas propiedades se introducirán en el simulador de procesos. El reactor se modelará con el módulo RYield de Aspen Plus, lo cual permitirá estimar los flujos másicos de los diferentes productos generados. Los resultados posibilitarán establecer el rendimiento de hidrógeno generado, así como su costo. Dicha información será utilizada para el escenario comparativo, en el cual el hidrógeno requerido en el proceso de hidrot ratamiento se genera mediante fuentes no renovables.

4.3 Estimación de parámetros de los modelos.

Para ambos modelos propuestos se estimarán los rendimientos de cultivos de segunda generación, rendimientos de procesos, y demás parámetros necesarios. También se establecerán los flujos de materiales e insumos, costos de obtención de los insumos, costos de logística y transporte tanto de materiales como producto terminado; cabe mencionar que se considerará el transporte por carretera, dado que no se dispone de la información del costo de transporte por ductos que es

como lo realiza Petróleos Mexicanos. Se considerarán también los potenciales sitios para la instalación de biorefinerías y las distancias entre éstas y los sitios de procesamiento de materia prima, así como de los consumidores finales, que es la red de aeropuertos de México. Los parámetros se buscaron en literatura, base de datos y sistemas de información, y se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Lista de parámetros y conjuntos estimados en el modelo matemático.

Nombre	Tipo	Descripción
A	Conjunto	ubicación de los sitios de consumo o mercados de bioturbosina y subproductos
AAU	Parámetro	área actual usada para el cultivo de materia prima
AD	Parámetro	área disponible para el cultivo de materia prima
ALFA	Parámetro	factor de conversión de la materia prima m al subproducto (j)
BETHA	Parámetro	factor de rendimiento del cultivo m en el sitio (i)
BMAX	Parámetro	capacidad máxima de cada planta (p_1) para producir bioturbosina
BMIN	Parámetro	capacidad mínima de cada planta (p_1) para producir bioturbosina
BTPC	Parámetro	toneladas de CO_2 producidas por tonelada de bioturbosina consumida
CBB	Parámetro	costo base de instalación de las plantas de bioturbosina
CBHR	Parámetro	costo base de instalación de las plantas de hidrógeno renovable
CDB	Parámetro	costo de dimensionamiento de la ruta de hidrotratamiento en las plantas de bioturbosina
CDHR	Parámetro	costo de dimensionamiento de cada ruta de procesamiento en las plantas de hidrógeno renovable
CMP	Parámetro	toneladas de CO_2 captadas por hectárea cultivada de materia prima m en el sitio (i)
GRB	Parámetro	costo base de instalación de la ruta de hidrotratamiento en las plantas de bioturbosina
CRHR	Parámetro	costo base de instalación de cada ruta de procesamiento en las plantas de producción de hidrógeno renovable
DB	Parámetro	demanda de bioturbosina en los mercados nacionales
DI	Parámetro	demanda de bioturbosina en los mercados internacionales
DSMAX	Parámetro	demanda máxima de cada subproducto en los mercados nacionales
FMROUTEMAX	Parámetro	flujo máximo de materias primas por ruta de procesamiento para la producción de hidrógeno

		renovable
FMROUTEMIN	Parámetro	flujo mínimo de materias primas por ruta de procesamiento para la producción de hidrógeno renovable
FROUTEMAX	Parámetro	flujo máximo de materia prima para hidrotatamiento de la bioturbosina
FROUTEMIN	Parámetro	flujo mínimo de materia prima para el hidrotatamiento de la bioturbosina
GAMA	Parámetro	factor de conversión de la biomasa m a hidrógeno renovable en el sitio (p_2) por la ruta (rhr)
I	Conjunto	sitios de cultivo de biomasa
IPSILO	Parámetro	coeficiente estequiométrico para el consumo de hidrógeno en la conversión de la biomasa m a bioturbosina
J	Conjunto	tipo de subproducto
M	Conjunto	tipo de biomasa utilizada para la producción de bioturbosina o hidrógeno renovable
P1	Conjunto	sitios de procesamiento de biomasa para la producción de bioturbosina
P2	Conjunto	ubicación de las plantas de producción de hidrógeno renovable
PHI	Parámetro	factor de conversión de la biomasa m a bioturbosina a través de la ruta r
PHRMAX	Parámetro	capacidad máxima de producción de hidrógeno renovable
PHRMIN	Parámetro	capacidad mínima de producción de hidrógeno renovable
PMP	Parámetro	toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de materia prima (m) procesada para producir bioturbosina
PMPHR	Parámetro	toneladas de CO ₂ por procesamiento de tonelada de materia prima para producir hidrógeno renovable
R	Conjunto	ruta de procesamiento para producir bioturbosina
RHR	Conjunto	ruta de procesamiento para producir hidrógeno renovable
SP	Parámetro	toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de subproducto (j) consumido en el mercado
SSP	Parámetro	toneladas de CO ₂ producidas por el consumo de toneladas de subproductos exportados
TBMI	Parámetro	toneladas de CO ₂ producidas por el consumo de toneladas de bioturbosina exportada
TBNI	Parámetro	CO ₂ producido por transporte de bioturbosina desde la planta (p_1) hasta el mercado internacional (bioturbosina exportada)
TBT	Parámetro	toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de bioturbosina transportada de la planta (p_1) a cualquier mercado
THRB	Parámetro	CO ₂ producido por transporte de hidrógeno renovable a

		las plantas de bioturbosina
TMPB	Parámetro	parámetro de emisión de CO ₂ por el transporte de biomasa a las plantas de bioturbosina
TMPHR	Parámetro	CO ₂ producido por el transporte de la materia prima a las plantas de producción de hidrógeno renovable
TSIN	Parámetro	CO ₂ producido por el transporte del subproducto (j) del mercado internacional a los mercados nacionales (subproductos importados)
TSNI	Parámetro	CO ₂ producido por transporte de subproductos desde la planta (p ₁) hasta el mercado internacional (subproducto exportado)
TSP	Parámetro	toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de subproducto (j) transportado del sitio de proceso a cualquier mercado
TTIN	Parámetro	CO ₂ producido por el transporte de bioturbosina del mercado internacional al mercado nacional (bioturbosina importada)
UCBI	Parámetro	costo unitario de la bioturbosina en el mercado internacional
UCBIOJETFUEL	Parámetro	precio unitario de la bioturbosina en el mercado (A)
UCBTPROCESSING	Parámetro	costo unitario de procesamiento de la materia prima m en la planta de bioturbosina (p ₁) a través de la ruta de hidrotratamiento
UCBYPRODUCT	Parámetro	precio unitario del subproducto (j) en el mercado (A)
UCFEEDSTOCK	Parámetro	costo unitario de la materia prima (m) cultivada en el sitio (i)
UCHRPROCESSING	Parámetro	costo unitario de procesamiento de la materia prima m en la planta (p ₂) a través de la ruta (rhr)
UCSI	Parámetro	costo unitario del subproducto (j) en el mercado internacional
UCTB	Parámetro	costo unitario de transporte de bioturbosina a los mercados
UCTBE	Parámetro	costo unitario de transporte de bioturbosina exportada
UCTBI	Parámetro	costo unitario de transporte de bioturbosina importada
UCTHRB	Parámetro	costo unitario de transporte de hidrógeno renovable enviado a las plantas de bioturbosina
UCTMB	Parámetro	costo unitario de transporte de biomasa a las plantas de producción de bioturbosina
UCTMHR	Parámetro	costo unitario de transporte de biomasa a las plantas de hidrógeno renovable
UCTS	Parámetro	costo unitario de transporte de subproducto (j) a los mercados (A)
UCTSE	Parámetro	costo unitario de transporte de subproducto (j) exportado desde la planta de bioturbosina (p ₁)
UCTSI	Parámetro	costo unitario de transporte de subproducto (j) importado

4.4 Definición de escenarios para los modelos propuestos.

Los modelos propuestos serán programados mediante el software GAMS Versión 25.1.2. Una vez los modelos estén programados se implementará una estrategia de solución de dichos modelos. Asimismo, se definirán 5 escenarios de estudio, los cuales se describen a continuación.

4.4.1 Escenario de estudio I

En el escenario I se determina la cadena de suministro para la producción de bioturbosina e hidrógeno renovable en México que maximice la ganancia y satisfaga la demanda de bioturbosina a nivel nacional bajo las siguientes consideraciones. Los sitios de cultivo son cada uno de los estados de la República. En cada estado puede existir una planta de procesamiento para bioturbosina e hidrógeno que tienen una capacidad máxima y mínima de producción. En cada planta de procesamiento de bioturbosina puede haber hasta una ruta de hidrotatamiento, con diferentes rendimientos, dependiendo de la materia prima procesada y productos secundarios. Para cada planta de hidrógeno puede haber hasta 3 rutas de procesamiento de la biomasa, y los mercados o sitios de consumos son cada uno de los estados del país. La cantidad producida de bioturbosina y subproductos queda acotada por la demanda de cada estado, y los excedentes pueden ser exportados al mercado internacional; en los casos que no se satisfaga la demanda nacional los faltantes pueden ser importados.

4.4.2 Escenario de estudio II

En el escenario II se determina la cadena de suministro para la producción de bioturbosina e hidrógeno renovable en México que maximice la ganancia y satisfaga la demanda local de bioturbosina en cada uno de los mercados del país bajo las siguientes consideraciones. Los sitios de cultivo son cada uno de los estados de la República. En cada estado puede existir una planta de procesamiento para bioturbosina e hidrógeno que tienen una capacidad máxima y mínima de producción. En cada planta de procesamiento de bioturbosina puede

haber hasta una ruta de procesamiento, con diferentes rendimientos, dependiendo de la materia prima procesada y productos secundarios. Para cada planta de hidrógeno puede haber hasta 3 rutas de procesamiento de la biomasa y los sitios de consumos son cada uno de los estados del país. La cantidad producida de bioturbosina y subproductos queda acotada por la demanda de cada estado localmente, y los excedentes de biocombustible o subproductos pueden ser utilizados en otros estados a nivel nacional o exportados al mercado internacional.

4.4.3 Escenario de estudio III

En el escenario III se determina la cadena de suministro para la producción de bioturbosina e hidrógeno renovable en México que maximice la ganancia y satisfaga la demanda de bioturbosina a nivel nacional; dicha producción está limitada por la disponibilidad de materia prima en todos los estados, de acuerdo con la variación de precios de la misma y bajo las siguientes consideraciones. Los sitios de cultivo son cada uno de los estados de la República. En cada estado puede existir una planta de procesamiento para bioturbosina e hidrógeno que tienen una capacidad máxima y mínima de producción. En cada planta de procesamiento de bioturbosina puede haber hasta una ruta de procesamiento, con diferentes rendimientos, dependiendo de la materia prima disponible procesada y productos secundarios. Para cada planta de hidrógeno puede haber hasta 3 rutas de procesamiento de la biomasa, y los mercados o sitios de consumos son cada uno de los estados del país. La cantidad producida de bioturbosina y subproductos queda acotada por la disponibilidad y rendimiento de las materias primas cultivadas en cada estado, buscando la satisfacción de la demanda nacional.

4.4.4 Escenario de estudio IV

En el escenario IV se determinó la cadena de suministro para la producción de bioturbosina e hidrógeno renovable en México que maximice la ganancia y satisfaga la demanda local de bioturbosina a nivel nacional, limitada por la disponibilidad de materia prima en todos los estados, de acuerdo con la variación

de precios de la misma y bajo las siguientes consideraciones. Los sitios de cultivo son cada uno de los estados donde existan la disponibilidad de tierras y condiciones para la producción de biomasa. En cada estado puede existir una planta de procesamiento para bioturbosina e hidrógeno que tienen una capacidad máxima y mínima de producción. En cada planta de procesamiento de bioturbosina puede haber hasta una ruta de procesamiento, con diferentes rendimientos, dependiendo de la materia prima procesada y productos secundarios. Para cada planta de hidrógeno puede haber hasta 3 rutas de procesamiento de la biomasa y los mercados de consumos son cada uno de los estados del país, satisfaciendo en primera estancia la demanda local de bioturbosina y subproductos. La cantidad producida de productos queda acotada por la disponibilidad de materias primas cultivadas en cada estado.

4.4.5 Escenario de estudio V

El escenario de estudio V constituye la Curva Pareto. El conjunto de Pareto se define como el conjunto de puntos en el espacio de búsqueda que se corresponden con las mejores soluciones al problema de optimización; y la frontera de Pareto como el conjunto de soluciones óptimas en el espacio objetivo. Este conjunto de soluciones se integra con aquellos puntos encontrados en el espacio objetivo que se corresponden con las soluciones no dominadas, de acuerdo con el criterio de dominancia de Pareto.

Por lo anterior se determina la cadena de suministro para la producción de bioturbosina e hidrógeno renovable en México que maximice la ganancia y minimice las emisiones de CO₂; dado que son dos objetivos el resultado será un conjunto de soluciones óptimas conocidas como la Curva Pareto.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos y se compararán las cadenas de suministro modeladas. Esta etapa abarca la verificación de la cobertura de los objetivos de producción de hidrógeno renovable para la generación de bioturbosina, cumplimiento de metas de producción del biocombustible, mediante la maximización de utilidad y minimización de emisiones de carbono. En todos los casos se busca satisfacer la demanda de bioturbosina cada uno de los aeropuertos de los estados de México; en los casos donde se genere excedentes tanto del biocombustible como de subproductos se exportarán en su totalidad, debido a que resulta conveniente en términos de maximizar la utilidad a lo largo de toda la cadena de suministro.

5.1 Escenario de estudio I. Maximización de la ganancia con satisfacción de la demanda nacional de bioturbosina

En el primer caso se consideró la máxima ganancia para la cadena de suministro de bioturbosina, produciendo hidrógeno renovable con la finalidad de satisfacer la demanda nacional del biocombustible. En este escenario, los resultados para la ganancia fueron de \$246,637,921.01 MXN. Las ventas totales para este caso son \$447,000,241.11 MXN al año, mientras que los costos totales fueron \$200,362,320.1 MXN al año; respecto de los costos totales, el 67.67 % representa el costo de la materia prima, 8.26 % el costo de procesamiento, 3.41 % el costo de transporte, y 20.66 % el costo de capital para la instalación de las plantas de bioturbosina e hidrógeno renovable. La producción de hidrógeno renovable fue de 940.13 kton a partir de biomasa de higuera, proveniente de los estados de México y Jalisco; dicha biomasa fue procesada mediante la ruta de pirolisis de biomasa en las plantas ubicada en estos mismos estados y distribuido a las plantas de producción de bioturbosina de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 4. El área total cultivada para producir bioturbosina, hidrógeno renovable y subproductos es 2,999,507.65 (ha). El CO₂ total capturado por el cultivo de las diferentes materias primas es 38,604.40 kton por año, las emisiones asociadas al

transporte son 8,181.18 kton por año, las emisiones asociadas al procesamiento de materia prima son 57,270.72 kton por año, y las emisiones asociadas al consumo de bioturbosina y subproductos son 22,815.63 kton por año, siendo así que las emisiones netas son 49,663.14 kton por año. Ahora bien, cuando se produce la turbosina se liberan a la atmósfera 56,952 kton, en el año 2018. Por lo que la producción de bioturbosina a partir de biomasa disminuye en 12.8 % las emisiones liberadas a la atmósfera por su consumo. En este escenario la producción de bioturbosina es menor que la de los subproductos de valor agregado; esto se ve reflejado en la ganancia, debido a que el precio en el mercado de estos últimos productos es un poco mayor al de la bioturbosina.

Tabla 4. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario de estudio I

Planta de procesamiento	Valor (ton)
AGUASCALIENTES	283.82
BAJA CALIFORNIA SUR	1,116.87
CAMPECHE	12,246.87
COAHUILA	840.88
COLIMA	490.97
CHIAPAS	29,039.60
CHIHUAHUA	62,633.19
CIUDAD DE MÉXICO	13,303.65
DURANGO	11,026.72
GUANAJUATO	672.36
GUERRERO	12,188.47
HIDALGO	3,922.61
JALISCO	125,996.91
EDO. DE MÉXICO	291,399.03
MICHOACÁN	99,810.26
MORELOS	1,826.94
NAYARIT	1,786.89
NUEVO LEÓN	1,698.00
OAXACA	2,126.44
PUEBLA	14,315.82
QUERÉTARO	256.39

QUINTANA ROO	7,455.74
SAN LUIS POTOSÍ	3,827.00
SINALOA	30,814.89
SONORA	1,686.41
TABASCO	19,848.08
TAMAULIPAS	18,679.24
TLAXCALA	12,555.69
VERACRUZ	88,768.44
YUCATÁN	31,926.61
ZACATECAS	37,582.48
TOTAL	940,127.26

Los resultados de producción de bioturbosina y subproductos se resumen en la Tabla 5, en los cuales se describe las hectáreas de cultivo de materia prima y en toneladas la producción de biomasa, al igual que los estados se encuentran ubicadas las plantas de hidrógeno renovable y bioturbosina con su la correspondiente producción en cada una de ellas.

Tabla 5. Resumen de resultados del escenario de estudio I. Maximización de la ganancia con satisfacción de la demanda nacional de bioturbosina

Estados Mexicanos	Área cultivada (Ha)	Producción de biomasa (ton)	Producción Bioturbosina (ton)	Producción Hidrógeno Renovable (ton)	Producción Diésel verde (ton)	Producción LPG (ton)	Producción Nafta (ton)	Mercado (ton/año)
AGUASCALIENTES			280.46		45.98	150.47	71.05	Aguascalientes
BAJA CALIFORNIA SUR			1,443.57		226.07	745.29	363.41	Baja California Sur
Palma de aceite	70.00	2,174.00						
Higuerilla	1,930.00	22,026.50						
CAMPECHE			18,335.50		983.74	4,258.80	4,200.59	Campeche
Palma de aceite	3,857.00	20,056.40						
Higuerilla	2,894.30	3,473.16						
COAHUILA			830.57		136.10	445.47	210.40	Coahuila
Camelina	6.00	1,016.80						
Higuerilla	1,237.10	5,237.10						
COLIMA			485.15		79.53	260.29	122.91	Colima
Jatropha Curcas	40.00	14,132.00						
Higuerilla	1,571.80	3,723.03						
CHIAPAS			23,437.75		944.63	4,580.81	5,300.68	Chiapas
Palma de aceite	34,215.05	48,740.64						

Higuerilla	1,228.20	2,749.20						
CHIHUAHUA			61,890.50		10,145.98	33,205.04	15,680.16	Chihuahua
Higuerilla	112,483.19	92,236.21						
CD. DE MÉXICO			18,086.61		2,965.02	9,703.70	4,582.30	Cd. De México
Higuerilla	6,482.30	44,602.43						
DURANGO			10,781.90		1,747.24	5,736.84	2,721.27	Durango
Camelina	80.00	202.48						
Higuerilla	15,828.81	34,031.94						
GUANAJUATO			664.39		108.92	356.45	168.32	Guanajuato
GUERRERO			27,854.22		4,566.27	1,494.41	7,056.96	Guerrero
Higuerilla	41,511.50	85,513.69						
HIDALGO			4,843.06		441.37	1,537.04	786.59	Cd. De México
Camelina	333.00	999.00						
Higuerilla	10,802.20	23,737.56						
JALISCO			440,705.01		71,659.22	23,456.96	110,801.14	Colima
Camelina	176.00	526.94						Guanajuato
Palma de aceite	10.00	41.20						Jalisco
Higuerilla	651,302.77	751,112.77		398,028.17				Nayarit
EDO. DE MÉXICO			683,310.84		111,949.92	36,644.41	173,084.13	Cd. De México
Camelina	226.00	681.39						
Higuerilla	615,321.30	1,039,893.00		542,099.09				
MICHOACÁN			322,995.76		45,164.62	14,781.15	69,799.87	Cd. De México Guanajuato Edo. De México
Higuerilla	411,955.20	741,519.36						Michoacán Querétaro
MORELOS			5,805.28		295.95	968.55	457.37	Morelos
Higuerilla	7,775.80	82,690.43						
NAYARIT			2,457.40		402.85	1,318.43	622.59	Nayarit
Higuerilla	3,662.30	29,521.98						
NUEVO LEÓN			2,369.57		388.45	171.30	600.34	Nuevo León
Higuerilla	3,531.40	15,538.16						
OAXACA			2,101.23		344.46	227.33	532.35	Cd. De México
Higuerilla	3,684.10	23,131.49						
PUEBLA			31,957.42		3,118.40	10,213.11	4,829.69	Cd. De México
Jatropha	79.00	1,410.90						Puebla
Higuerilla	28,324.20	104,799.54						
QUERÉTARO			253.35		41.53	135.92	64.19	Querétaro
QUINTANA ROO			19,343.62		1,531.74	501.30	2,367.24	Quintana Roo
Higuerilla	3,633.10	32,216.19						

SAN LUIS POTOSÍ			23,298.28		448.19	1,514.35	815.28	San Luis Potosí
Palma de aceite	740.00	4,917.60						
Higuerilla	3,824.20	15,564.49						
SINALOA			50,212.34		8,231.53	2,693.96	12,721.46	Sinaloa
Higuerilla	74,832.10	160,889.02						
SONORA			1,666.41		273.18	894.05	422.19	Sonora
Higuerilla	3,311.30	2,483.48						
TABASCO			28,103.29		787.52	369.79	4,106.97	Tabasco
Palma de aceite	9,526.47	71,625.09						
Higuerilla	1,261.50	4,667.55						
TAMAULIPAS			18,084.58		1,141.35	540.68	3,650.45	Tamaulipas
Camelina	9,580.77	68,203.46						
Higuerilla	8,871.10	9,411.37						
TLAXCALA			16,406.81		2,033.90	665.64	3,143.31	Tlaxcala
Camelina	9.00	27.45						Cd. De México
Higuerilla	280,446.20	18,490.03						
VERACRUZ			533,666.59		29,559.16	9,791.83	48,723.43	Veracruz
Palma de aceite	7,002.00	22,756.50						Cd. De México
Higuerilla	350,017.70	362,513.28						
YUCATÁN			70,649.30		10,031.52	32,830.45	15,503.27	Yucatán
Higuerilla	102,904.40	432,198.50						Campeche
ZACATECAS			315,815.38		7,707.91	2,522.59	11,912.23	Zacatecas
Higuerilla	182,929.28	70,489.89						Aguascalientes San Luis Potosí
Total	2,999,507.65	4,471,973.20	2,738,136.13	940,127.26	317,502.26	202,716.41	505,422.12	

Una representación esquemática de esta solución se presenta en la Figura 6, en la cual se observa que, aunque en Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro no se produce biomasa, sí se instalan plantas de producción de bioturbosina con pequeña capacidad. La demanda de bioturbosina faltante en estos estados es cubierta por las plantas de Michoacán y el Estado de México. Asimismo, la demanda de bioturbosina de la Ciudad de México es mucho mayor que su producción, por lo que es completada por las plantas de Veracruz, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala y Michoacán. Una situación similar sucede en San Luis Potosí y Aguascalientes, donde la bioturbosina faltante se suministra de las plantas de Zacatecas y Jalisco. Por otra parte, en cada estado donde existe una planta de

bioturbosina se cubre la demanda del biocombustible, lo que posibilita satisfacer la demanda nacional en 29 estados de los 32 que tiene la República.



Figura 6. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio I

5.2 Escenario de estudio II. Maximización de la ganancia, satisfaciendo la demanda local de bioturbosina

En este caso se consideró la máxima ganancia para la cadena de suministro de bioturbosina, produciendo hidrógeno renovable con la finalidad de satisfacer la demanda local del biocombustible. Para este escenario los resultados para la ganancia fueron de \$ 290,488,207.12 MXN. Las ventas totales fueron de \$485,693,670.2 MXN al año, mientras que los costos totales fueron \$195,205,463.09 MXN al año; de los costos totales, el 56.52 % se debe al costo de la materia prima, 30.45 % al costo de procesamiento, 0.81 % por el costo de

transporte y 12.22 % por el costo de capital para la instalación de las plantas de bioturbosina e hidrógeno renovable. Lo anterior demuestra una notable reducción en el costo de transporte debido a que en todos los estados se cultivan las materias primas y allí mismo se procesan tanto en bioturbosina, hidrógeno renovable y subproductos, por lo tanto, se consumen de manera local estos productos e insumos, solo en algunos estados se transporta para completar la demanda.

La producción de hidrógeno renovable fue de 858.39 kton, a partir de palma de aceite e higuera principalmente. Dicha biomasa provino de 11 estados, donde se encuentran ubicadas las plantas de producción de este insumo (Chihuahua, Cd. de México, Durango, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Puebla, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán). La biomasa fue procesada mediante las rutas de gasificación y pirólisis, y distribuida a las plantas de producción de bioturbosina de acuerdo con la Tabla 6. El área total cultivada para producir bioturbosina, hidrógeno renovable y subproductos es 4,764,539.93 (ha). Los resultados de producción de bioturbosina y subproductos se resumen en la Tabla 7; en todos los estados de la república se produce la bioturbosina y se distribuye localmente para satisfacer completamente la demanda nacional, mientras que los excesos son distribuidos al mercado internacional para exportarla. El CO₂ total capturado por el cultivo de las diferentes materias primas es 59,973.24 kton por año, las emisiones asociadas al transporte son 8,253.96 kton por año, las emisiones asociadas al procesamiento de materia prima son 61,933.75 kton por año, y las emisiones asociadas al consumo de bioturbosina y subproductos son 33,191.76 kton por año; siendo así que las emisiones netas son 43,406.23 kton por año. Ahora bien, cuando se produce la turbosina se liberan a la atmósfera 56,952 kton, en el año 2018. Por lo que la producción de bioturbosina a partir de biomasa disminuye en 23.8 % las emisiones liberadas a la atmósfera por su consumo.

Tabla 6. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario II

Planta de procesamiento	Valor (ton)
AGUASCALIENTES	1,192.47
BAJA CALIFORNIA NORTE	1,080.38
BAJA CALIFORNIA SUR	3,763.12
CAMPECHE	4,924.69
COAHUILA	1,004.09
COLIMA	3,090.97
CHIAPAS	8,052.43
CHIHUAHUA	54,493.61
CD. DE MÉXICO	73,625.95
DURANGO	85,798.50
GUANAJUATO	6,720.36
GUERRERO	4,190.65
HIDALGO	3,092.26
JALISCO	98,733.17
EDO. DE MÉXICO	78,421.60
MICHOACÁN	67,881.03
MORELOS	1,826.94
NAYARIT	2,486.89
NUEVO LEÓN	6,259.53
OAXACA	2,638.95
PUEBLA	69,315.82
QUERÉTARO	2,560.39
QUINTANA ROO	14,835.31
SAN LUIS POTOSÍ	3,827.00
SINALOA	59,035.59
SONORA	5,971.07
TABASCO	41,780.55
TAMAULIPAS	55,816.03
TLAXCALA	125.56
VERACRUZ	42,087.68
YUCATÁN	51,752.98
ZACATECAS	2,000.68
TOTAL	858,386.25

Asimismo, para este escenario se satisface de manera total toda la demanda local, y se produce un excedente de bioturbosina de 124.58 kton; dicha bioturbosina es enviada al mercado internacional, y también se producen una mayor cantidad de subproductos que en el escenario anterior, lo cual se refleja en el incremento de la ganancia.

Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos en el escenario de estudio II. Maximización de la ganancia, satisfaciendo la demanda local de bioturbosina

Estados Mexicanos	Área cultivada (Ha)	Producción de biomasa (ton)	Producción Bioturbosina (ton)	Producción Hidrógeno Renovable (ton)	Producción Diésel verde (ton)	Producción LPG (ton)	Producción Nafta (ton)	Mercado (ton/año)
AGUASCALIENTES			460.18		45.98	150.47	71.05	Aguascalientes
Jatropha Curcas	40.00	2,174.00						
Palma de aceite	97.00	417.97						
BAJA CALIFORNIA NORTE			180.46		79.53	260.29	122.91	Baja California Norte
Camelina	80.00	20,056.40						
Higuerilla	165.00	5,237.10						
BAJA CALIFORNIA SUR			16,987.81		810.44	3,667.14	3,869.63	Baja California Sur
Palma de aceite	13,056.00	19,584.00						
Higuerilla	1,930.00	2,026.50						
CAMPECHE			18,335.50		983.74	4,258.80	4,200.59	
Palma de aceite	3,857.00	20,056.40						
Higuerilla	2,894.30	3,473.16						
COAHUILA			830.57		136.10	445.47	210.40	Coahuila
Camelina	82.00	1,016.80						
Higuerilla	14,237.10	5,237.10						
COLIMA			485.15		445.47	210.40	79.53	Colima
Jatropha Curcas	97.00	14,132.00						
Higuerilla	26,571.80	3,723.03						
CHIAPAS			39,034.90		24,195.10	79,183.98	37,392.43	Chiapas
Palma de aceite	57,483.27	48,740.64						
Higuerilla	2,586.20	2,749.20						
CHIHUAHUA			147,590.13		1,530.99	7,512.60	8,818.83	Chihuahua
Higuerilla	268,238.40	92,236.21		115,604.11				
CD. DE MÉXICO			121,986.06		79,183.98	37,392.43	2,845.92	Cd. De México
Jatropha Curcas	67.00	105.00		18,184.19				

Palma de aceite	8,357.60	7,521.84		36,368.37				
Higuerilla	14,782.50	44,602.43		54,552.56				
DURANGO			572,860.01		5,403.44	93,891.20	307,298.87	Durango
Camelina	109.00	202.48		27,751.53				
Higuerilla	853,501.10	34,031.94		83,254.59				
GUANAJUATO			664.39		145,125.56	108.92	356.45	Guanajuato
Camelina	60.00	98.00						
Palma de aceite	196.00	263.00						
GUERRERO			36,054.80		168.32	4,874.56	16,485.60	Guerrero
Palma de aceite	4,608.26	10,276.42						
Higuerilla	41,511.50	85,513.69						
HIDALGO			3,308.26		8,906.71	441.37	1,537.04	Hidalgo
Camelina	2,733.00	999.00						Cd. De México
Higuerilla	2,849.60	23,737.56						
JALISCO			763,848.72		786.59	125,167.97	409,689.20	Jalisco
Camelina	206.00	526.94		32,678.37				Colima
Palma de aceite	80.00	329.60		16,339.19				Guanajuato
Higuerilla	1,137,746.00	851,302.77		49,017.56				Nayarit
EDO. DE MÉXICO			773,588.03		193,496.48	115,609.49	384,146.50	Edo. De México
Camelina	269.00	681.39		21,303.02				Cd. De México
Palma de aceite	59,087.70	110,494.00		40,306.05				
Higuerilla	851,321.30	1,039,893.00		44,406.05				
MICHOACÁN			275,504.21		193,505.85	45,164.62	147,811.50	Michoacán
Palma de aceite	90.00	278.00		21,503.78				Cd. De México Edo. De México
Higuerilla	519,575.20	935,235.36		64,511.34				Guanajuato Querétaro
MORELOS			1,805.28		69,799.87	295.95	968.55	Morelos
Jatropha	50.00	98.00						
Higuerilla	8,677.60	82,690.43						
NAYARIT			2,457.40		457.37	402.85	1,318.43	Nayarit
Higuerilla	4,682.30	29,521.98						
NUEVO LEÓN			4,668.10		622.59	474.86	1,703.36	Nuevo León
Palma de aceite	4,721.90	2,880.36						
Higuerilla	3,531.40	15,538.16						
OAXACA			2,406.29		1,118.80	355.93	1,184.68	Oaxaca
Palma de aceite	378.50	382.29						
Higuerilla	3,684.10	23,131.49						
PUEBLA			49,065.12		601.16	3,118.40	10,213.11	Puebla
Jatropha Curcas	159.00	1,410.90		14,508.78				Cd. De México

Higuerilla	27,214.20	100,692.54		43,526.34				
QUERÉTARO			253.35		4,829.69	41.53	135.92	Querétaro
Jatropha Curcas	70.00	101.00						
Higuerilla	3,662.30	377.57						
QUINTANA ROO			11,980.33		64.19	1,451.21	5,012.97	Quintana Roo
Palma de aceite	4,843.90	5,086.10						
Higuerilla	3,932.10	32,216.19						
SAN LUIS POTOSÍ			3,298.28		2,922.47	448.19	1,514.35	San Luis Potosí
Palma de aceite	1,740.00	4,917.60						
Higuerilla	3,742.20	15,230.75						
SINALOA			55,105.62		8,415.49	27,859.34	13,825.20	Sinaloa
Palma de aceite	7,056.30							
Higuerilla	74,832.10	160,889.02						
SONORA			1,835.85		460.41	1,054.53	5,032.99	Sonora
Palma de aceite	249.80	6,131.92		32,690.08				
Higuerilla	3,311.30	2,483.48		16,345.04				
TABASCO			25,205.95		7,608.70	2,033.90	6,656.41	Tabasco
Palma de aceite	13,447.43	71,625.09						
Higuerilla	1,261.50	4,667.55						
TAMAULIPAS			315,632.80		5,709.07	1,801.06	8,705.29	Tamaulipas
Camelina	9,580.77	68,203.46		24,017.56				
Palma de aceite	8,796.10	21,990.25		12,008.78				
Higuerilla	8,871.10	9,411.37		12,008.78				
TLAXCALA			12,406.81		29,559.16	97,918.25	48,723.43	Tlaxcala
Camelina	49.00	149.45						Cd. De México
Higuerilla	18,446.20	18,490.03						
VERACRUZ			194,306.09		6,656.41	3,143.31	29,559.16	Veracruz
Palma de aceite	5,109.00	22,756.50		15,681.70				Cd. De México
Higuerilla	39,019.70	362,513.28		31,363.41				
YUCATÁN			173,219.78		92,934.61	43,885.79	32,409.10	Yucatán
Higuerilla	267,741.20	1,124,513.04		30,455.11				
ZACATECAS			197,695.50		106,066.14	3,143.31	32,409.10	Zacatecas
Higuerilla	347,113.10	70,489.89						Aguascalientes San Luis Potosí
Total	4,764,539.93	5,645,542.60	3,823,061.72	858,386.25	992,630.40	705,768.12	1,524,308.50	

Una representación esquemática de esta solución se presenta en la Figura 7; en esta Figura no se especifican los estados donde se produce la biomasa dado que

en los 32 estados de la república se cultiva. Además, en 11 estados se toma la materia prima para generar además de bioturbosina, hidrógeno renovable. Debido a que en todos los estados se produce bioturbosina se cubre la demanda local con cada una de las plantas; no obstante, en Guanajuato, Cd. de México Querétaro y San Luis Potosí se suple con la producción de las plantas de Michoacán, Estado de México, Jalisco y Zacatecas.



Figura 7. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio II

5.3 Escenario de estudio III. Maximización de la ganancia, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa en cada estado y satisfaciendo la demanda nacional de bioturbosina

En este caso se consideró la máxima ganancia para la cadena de suministro de bioturbosina, con la finalidad de satisfacer la demanda nacional del biocombustible. Para este escenario, los resultados para la ganancia fueron \$294,305,135.04 MXN. Las ventas totales para este caso fueron \$580,893,391.26 MXN al año, mientras que los costos totales fueron \$ 286,588.27 MXN al año; los costos totales se componen de 60.03 % por el costo de la materia prima, 19.23 % por el costo de procesamiento, 2.85 % por el costo de transporte y 17.89 % por el costo de capital para la instalación de las plantas de bioturbosina e hidrógeno renovable. La producción de hidrógeno renovable fue de 642.58 kton, a partir de palma de aceite, higuera y camelina; dicha biomasa proviene de los estados donde se encuentran ubicadas las plantas de producción de este insumo (Hidalgo y Puebla). La biomasa fue procesada mediante las rutas de producción de gasificación, fermentación y pirólisis, y distribuida a las plantas de producción de bioturbosina de acuerdo con la Tabla 8. El área total cultivada para producir bioturbosina, hidrógeno renovable y subproductos es 5,545,347.77 (ha). Los resultados de producción de bioturbosina y subproductos se resumen en la Tabla 9; asimismo, se resalta que de los 32 estados se produce biomasa en 27, y en 9 se genera la bioturbosina que se distribuye de acuerdo con la distancia más cercana tanto a las plantas de producción de hidrógeno renovable y bioturbosina, debido a que los estados donde se produce el hidrógeno no son los mismos donde se produce la bioturbosina. El CO₂ total capturado por el cultivo de las diferentes materias primas es 43,624.62 kton por año, mientras que las emisiones asociadas al transporte son 4,023.61 kton por año, las emisiones asociadas al procesamiento de materia prima son 67,600.74 kton por año, y las emisiones asociadas al consumo de bioturbosina y subproductos son 17,952.36 kton por año. Así, las emisiones netas son 45,952.01 kton por año. Ahora bien, cuando se produce la turbosina se liberan a la atmósfera 56,952 kton, en el año 2018. Por lo que la

producción de bioturbosina a partir de biomasa disminuye en 19.3 % las emisiones liberadas a la atmósfera por su consumo.

Tabla 8. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario III

Planta de procesamiento	Valor (ton)
CHIHUAHUA	43,677.33
DURANGO	107,282.02
JALISCO	97,227.37
EDO. DE MÉXICO	235,255.79
MICHOACÁN	32,061.64
QUERÉTARO	3.37
VERACRUZ	60,197.08
YUCATÁN	16,890.26
ZACATECAS	50,071.10
TOTAL	642,665.97

En este escenario la producción de bioturbosina fue de 28.29 toneladas menos que en el escenario anterior, a pesar de que la producción de biomasa es superior en 1,760.33 kton; por lo que se obtiene una buena ganancia con una cantidad baja de emisiones y se cubre la demanda de biocombustible.

Tabla 9. Resumen de resultados del escenario de estudio III. Maximización de la ganancia, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa en cada estado y satisfaciendo la demanda nacional de bioturbosina

Estados Mexicanos	Área cultivada (Ha)	Producción de biomasa (ton)	Producción Bioturbosina (ton)	Producción Hidrógeno Renovable (ton)	Producción Diésel verde (ton)	Producción LPG (ton)	Producción Nafta (ton)	Mercado (ton/año)
BAJA CALIFORNIA SUR								
Palma de aceite	13,056.00	2,026.50						
Higuerilla	1,930.00	105.00						
CAMPECHE								
Palma de aceite	3,857.00	35,484.40						
Higuerilla	2,894.30	3,473.16						
COAHUILA								
Camelina	95.00	48.09						
Higuerilla	14,237.10	723.03						

COLIMA								
Jatropha Curcas	97.00	20.00						
Higuerilla	26,571.80	723.03						
CHIAPAS								
Palma de aceite	57,483.27	28,740.64						
Higuerilla	2,586.20	749.20						
CHIHUAHUA			91,412.66		24,468.29	80,078.03	37,814.62	Chihuahua
Higuerilla	268,238.40	219,955.49						Baja California Norte
DURANGO			440,964.43		102,475.65	335,374.85	158,371.46	Durango Baja California Sur
Camelina	109.00	282.48						Coahuila Nayarit
Higuerilla	853,501.10	853,501.10						Nuevo León Sinaloa
GUERRERO								
Higuerilla	41,511.50	41,511.50						
HIDALGO								
Camelina	2,733.00	1,665.00		71,407.33				
Palma de aceite	851,321.30	141,454.58		142,814.66				
Higuerilla	2,849.60	3,737.56		214,221.99				
JALISCO			518,020.07		125,634.45	41,116.73	194,162.33	Jalisco
Camelina	206.00	526.94						Colima
Palma de aceite	80.00	3.46						Michoacán
Higuerilla	1,137,746.00	1,137,746.00						Nayarit
EDO. DE MÉXICO			984,857.17		224,051.03	76,505.18	42,824.65	Edo. De México
Camelina	269.00	907.39						Cd. De México
Palma de aceite	59,087.70	245,819.17						Guerrero
Higuerilla	851,321.30	1,039,893.00						Tamaulipas
MICHOACÁN			106,972.04		647.56	4,101.20	3,237.79	Michoacán
Palma de aceite	1,290.00	195,670.31						
Higuerilla	519,575.20	411,955.20						
MORELOS								
Higuerilla	8,677.60	2,690.43						
NAYARIT								
Higuerilla	4,682.30	3,662.30						
NUEVO LEÓN								
Higuerilla	3,531.40	3,211.60						
OAXACA								
Higuerilla	3,684.10	3,131.49						

PUEBLA								
Jatropha Curcas	159.00	71.10		32,844.40				
Palma de aceite	4,843.90	28,046.03		95,688.80				
Higuerilla	27,214.20	28,324.20		85,688.80				
QUERÉTARO			57,948.65		0.02	0.11	0.09	Querétaro
Camelina	207.00	1,405.78						
QUINTANA ROO								
Higuerilla	3,932.10	2,216.19						
SAN LUIS POTOSÍ								
Palma de aceite	1,740.00	917.60						
Higuerilla	3,742.20	334.20						
SINALOA								
Higuerilla	74,832.10	74,832.10						
SONORA								
Higuerilla	3,311.30	2,483.48						
TABASCO								
Palma de aceite	13,447.43	21,625.09						
Higuerilla	1,261.50	1,261.50						
TAMAULIPAS								
Camelina	9,580.77	18,203.46						
Higuerilla	8,871.10	5,411.37						
VERACRUZ			496,018.61		45,506.29	22,753.15	27,303.78	Veracruz Chiapas
Palma de aceite	5,109.00	1,431,026.35						Cd. De México Hidalgo
Higuerilla	39,019.70	337,513.28						Puebla Tlaxcala
YUCATÁN			200,537.29		30,216.13	98,889.14	4,669.76	Yucatán
Higuerilla	267,741.20	267,741.20						Campeche Quintana Roo
ZACATECAS			898,042.26		89,575.54	29,315.63	13,843.49	Zacatecas Aguascalientes Guanajuato
Higuerilla	347,113.10	805,046.14						Cd. De México Nuevo León Querétaro San Luis Potosí
Total	5,545,347.77	7,405,877.09	3,794,773.18	642,665.97	642,574.95	688,134.02	482,227.97	

Una representación esquemática de esta solución se presenta en la Figura 8; en esta Figura los estados coloreados de gris no tienen producción de biomasa para

producción de bioturbosina e hidrógeno renovable; no obstante, la demanda de estos estados es cubierta por la producción de las plantas del Estado de México, Veracruz, Zacatecas y Chihuahua.

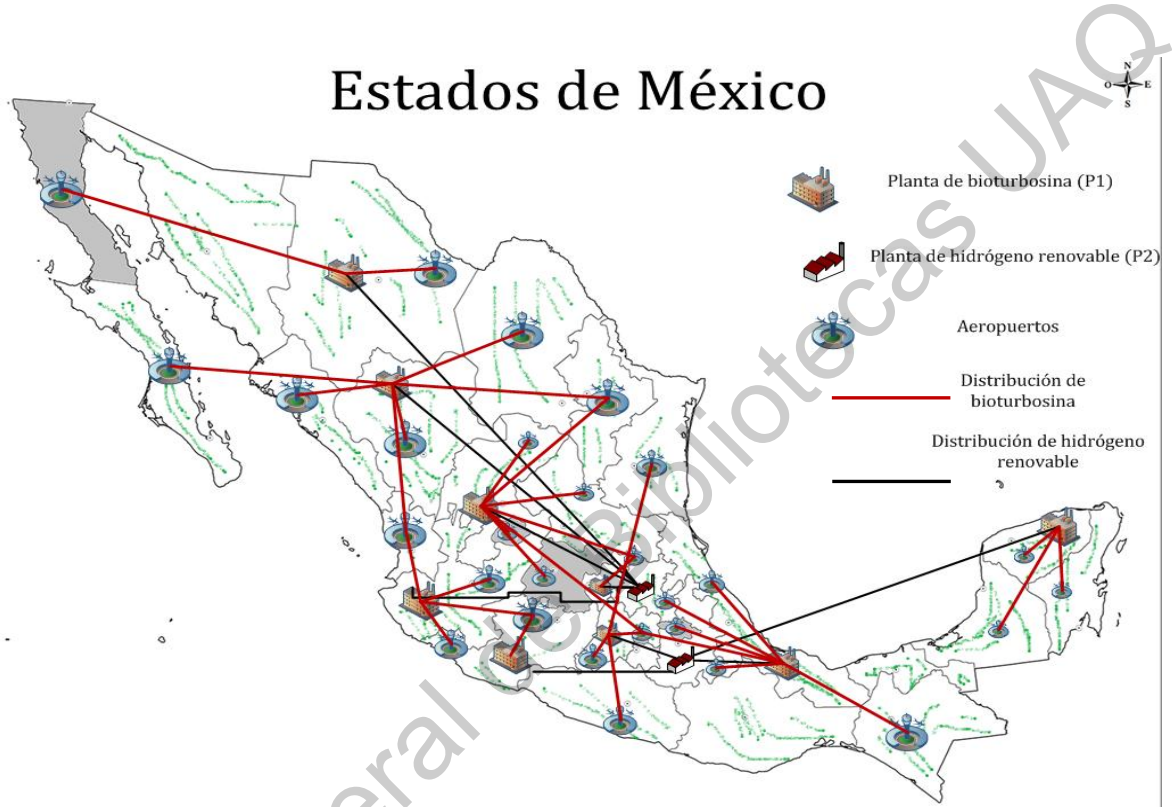


Figura 8. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio III

5.4 Escenario de estudio IV. Maximización de la ganancia, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa en cada estado y satisfaciendo la demanda local de bioturbosina

En este caso se consideró la máxima ganancia para la cadena de suministro de bioturbosina, con la finalidad de satisfacer la demanda local del biocombustible. Para este escenario, la ganancia fue de \$337,862,932.2 MXN. Las ventas totales para este caso fueron \$678,644,817.1 MNX al año, mientras que los costos totales fueron \$340,781,881.93 MXN al año; el costo total está constituido por 61.06 % por el costo de la materia prima, 17.32 % por el costo de procesamiento, 2.92 %

por el costo de transporte y 18.7 % por el costo de capital para la instalación de las plantas de bioturbosina e hidrógeno renovable. La producción de hidrógeno renovable fue de 961.09 kton, a partir de palma de aceite, higuera y camelina, proveniente de los estados donde se encuentran ubicadas las plantas de producción de este insumo (Guerrero, Jalisco y Estado de México). La biomasa es procesada mediante gasificación, fermentación y pirólisis, y distribuida a las plantas de producción de bioturbosina de acuerdo con la Tabla 10. El área total cultivada para producir bioturbosina, hidrógeno renovable y subproductos es 3,588,975.99 (ha). El CO₂ total capturado por el cultivo de las diferentes materias primas es 48,673.79 kton por año, las emisiones asociadas al transporte son 4,631.9 kton por año, las emisiones asociadas al procesamiento de materia prima son 64,030.86 kton por año, y las emisiones asociadas al consumo de bioturbosina y subproductos son 21,252.08 kton por año; así, las emisiones netas son 41,241.05 kton por año. Ahora bien, cuando se produce la turbosina se liberan a la atmósfera 56,952 kton, en el año 2018. Por lo que la producción de bioturbosina a partir de biomasa disminuye en 27.6 % las emisiones liberadas a la atmósfera por su consumo. A diferencia del caso anterior, a pesar de que la producción de biomasa es alta, las emisiones asociadas con los procesos de transformación y consumo de los biocombustibles no se compensan con la captura de emisiones en el cultivo.

Tabla 10. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario IV

Planta de procesamiento	Valor (ton)
CHIAPAS	90,231.70
CHIHUAHUA	71,307.44
DURANGO	107,157.42
GUERRERO	112,936.95
JALISCO	150,227.37
EDO. DE MÉXICO	127,490.61
MICHOACÁN	8.81
NAYARIT	12.79

VERACRUZ	102,849.46
YUCATÁN	104,768.57
ZACATECAS	94,099.66
Total	961,090.78

Los resultados de producción de bioturbosina y subproductos se resumen en la Tabla 11; es de resaltar que de los 32 estados se produce biomasa en 26, en 11 la bioturbosina y en 3 el hidrógeno, supliendo la demanda local del biocombustible.

Tabla 11. Resumen de resultados del escenario de estudio IV. Maximización de la ganancia, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa en cada estado y satisfaciendo la demanda local de bioturbosina

Estados Mexicanos	Área cultivada (Ha)	Producción de biomasa (ton)	Producción Bioturbosina (ton)	Producción Hidrógeno Renovable (ton)	Producción Diésel verde (ton)	Producción LPG (ton)	Producción Nafta (ton)	Mercado (ton/año)
BAJA CALIFORNIA SUR								
Palma de aceite	13,056.00	105.00						
Higuerilla	1,930.00	2,026.50						
CAMPECHE								
Palma de aceite	3,857.00	950,587.44						
Higuerilla	2,894.30	3,473.16						
COAHUILA								
Camelina	82.00	0.60						
Higuerilla	14,237.10	1,237.10						
COLIMA								
Higuerilla	26,571.80	723.03						
CHIAPAS			166,795.43		11,632.61	58,163.04	69,795.65	Chiapas
Palma de aceite	57,483.27	366,128.53						Tabasco
Higuerilla	2,586.20	749.20						
CHIHUAHUA			92,318.82		24,696.20	80,832.55	38,189.11	Chihuahua
Palma de aceite	14,782.50	115.75						Baja California Norte
Higuerilla	268,238.40	219,955.49						
DURANGO			340,222.73		102,252.73	33,464.53	158,026.95	Durango
Camelina	109.00	282.48						Baja California Sur Coahuila Nayarit
Higuerilla	853,501.10	653,701.60						Nuevo León Sinaloa
GUERRERO			335,345.38		30,765.63	153,828.15	184,593.78	Guerrero
Palma de aceite	14,608.26	1,025,521.03		240,272.69				Cd. De México Guanajuato
Higuerilla	41,511.50	29,511.30		80,090.90				Edo. De México
HIDALGO								
Camelina	2,733.00	1,665.00						
Higuerilla	2,849.60	3,737.56						
JALISCO			418,020.07		125,634.45	41,116.73	194,162.33	Jalisco
Camelina	206.00	526.94		53,393.93				Sinaloa
Palma de aceite	80.00	3.46		26,696.97				Colima

Higuerilla	11,377.46	2,387.75		80,090.90				
EDO. DE MÉXICO			581,964.93		205,563.23	67,275.24	31,768.86	Edo. De México
Camelina	269.00	907.39		96,109.08				Cd. De México
Higuerilla	851,321.30	939,893.00		384,436.31				Guerrero
MICHOACÁN			106.38		0.60	3.60	3.20	Michoacán
Higuerilla	519,575.20	211,955.20						
MORELOS								
Higuerilla	8,677.60	2,690.43						
NAYARIT			297.72		1.63	8.13	9.76	Nayarit
Higuerilla	4,682.30	3,662.30						Colima Michoacán
NUEVO LEÓN								
Higuerilla	3,531.40	15,335.40						
OAXACA								
Higuerilla	3,684.10	3,131.49						
PUEBLA								
Jatropha Curcas	159.00	20.01						
Higuerilla	27,214.20	28,324.20						
QUINTANA ROO								
Higuerilla	3,932.10	2,216.19						
SAN LUIS POTOSÍ								
Palma de aceite	1,740.00	917.60						
Higuerilla	3,742.20	4,334.20						
SINALOA								
Higuerilla	74,832.10	94,537.10						
SONORA								
Higuerilla	3,311.30	2,483.48						
TABASCO								
Palma de aceite	13,447.43	21,625.09						
Higuerilla	1,261.50	11,767.50						
TAMAULIPAS								
Camelina	9,580.77	18,203.46						
Higuerilla	8,871.10	5,411.37						
VERACRUZ			428,348.32		39,305.93	19,739.31	23,518.80	Veracruz Chiapas
Palma de aceite	5,109.00	66,611.89						Cd. De México Hidalgo
Higuerilla	39,019.70	337,513.28						Puebla Tlaxcala
YUCATÁN			277,719.37		46,464.40	17,998.81	14,382.02	Yucatán
Palma de aceite	18,446.20	288,274.54						Campeche
Higuerilla	267,741.20	167,771.20						Quintana Roo
ZACATECAS			396,190.06		105,919.38	37,487.55	23,649.79	Zacatecas Aguascalientes
Palma de aceite	39,019.70	343,873.46						Guanajuato Cd. De México Nuevo León
Higuerilla	347,113.10	205,046.14						San Luis Potosí
Total	3,588,975.99	6,038,944.82	3,037,329.22	961,090.78	692,236.78	509,917.65	738,100.26	

Una representación esquemática de esta solución se presenta en la Figura 9; en la Figura se observa que se produce bioturbosina en dos plantas adicionales al escenario anterior, que están ubicados en los estados de Nayarit y Guerrero. Además, no se produce biomasa en Aguascalientes, Baja California Norte, Cd. de México y Tlaxcala. Finalmente, la planta de hidrógeno que más distribuye este insumo es la ubicada en el Estado de México.



Figura 9. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio IV

5.5 Escenario de estudio V. Curva de Pareto

La Tabla 12 muestra los puntos óptimos que conforman la Curva de Pareto, los cuales se obtienen maximizando las ganancias y minimizando las emisiones de dióxido de carbono.

Tabla 12. Puntos de frente de Pareto

EMISIONES (Ton CO ₂)	Ganancia (\$)
227,130.00	- 85,900,000.00
25,209,846.60	86,709,000.00
30,701,204.90	130,210,000.00
39,913,739.97	172,750,000.00
55,744,278.00	214,330,000.00
69,623,565.00	255,530,000.00
83,502,852.00	290,490,000.00
97,382,139.00	314,600,000.00
111,261,426.00	338,050,000.00
125,140,713.00	359,080,000.00

La Figura 10 muestra la curva Pareto correspondiente a la producción total de bioturbosina para satisfacer la demanda en México, donde es posible localizar la mejor solución (el punto más cercano al punto de utopía).

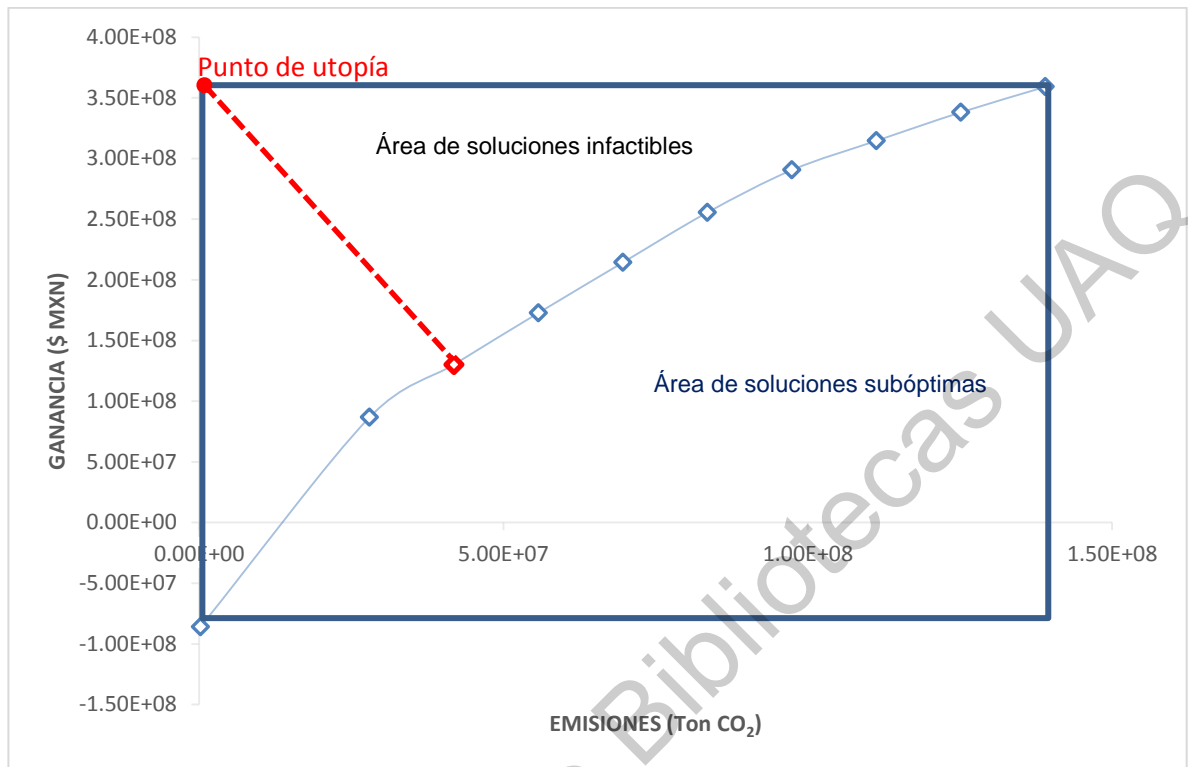


Figura 10. Curva de frente de Pareto para solución compensada Ganancia vs Emisiones

El punto de utopía es la solución deseada, pero es un punto inalcanzable porque está localizado en el área infactible de la curva Pareto. Las coordenadas del punto de utopía son la máxima ganancia posible y el mínimo de emisiones de dióxido de carbono posibles, pero éstos no pueden ocurrir al mismo tiempo dado que son objetivos en conflicto. Por lo tanto, para reducir las emisiones de dióxido de carbono debe aceptarse la disminución del beneficio económico; por otra parte, el incremento del beneficio económico está asociado con el incremento de las emisiones de dióxido de carbono. Por lo tanto, la mejor solución posible (solución compensada) se determina mediante el método de restricciones de Épsilon, como se muestra a continuación.

5.5.1 Solución Compensada

Este caso considera la satisfacción de la demanda de bioturbosina de todos los aeropuertos de México, mientras que el beneficio de la ganancia y la cantidad de emisiones de dióxido de carbono son optimizados. Los resultados de la ganancia

fueron de \$ 172,752,048.41 MXN. Las ventas totales para este caso fueron de \$288,164,113.3 MXN al año, mientras que los costos totales fueron \$115,412,064.88 MXN al año; el costo total está constituido por 30.11 % por el costo de procesamiento de la materia prima, 56.29 % por el costo de la biomasa, 1.36 % por el costo de transporte y 12.24 % por el costo de capital para la instalación de las plantas de bioturbosina e hidrógeno renovable. La producción de hidrógeno renovable fue de 1,130.122 kton de biomasa de *Jatropha curca*, proveniente de los estados de Colima y Puebla; dicha biomasa fue procesada mediante la ruta de gasificación en la planta ubicada en el estado de Nuevo León, y distribuido a las plantas de producción de bioturbosina de acuerdo con la Tabla 13. El área total cultivada para producir bioturbosina, hidrógeno renovable y subproductos es 4,604,341.92 (ha). Los resultados de producción de bioturbosina y subproductos se resumen en la Tabla 14. El CO₂ total capturado por el cultivo de las diferentes materias primas es 338.28 kton por año, debido a que el 68.19% de la biomasa cultivada es higuierilla y esta planta es la que tiene el factor más bajo de captura de CO₂ por cultivo en todos los estados mexicanos. Las emisiones asociadas al transporte son 396.55 kton por año, las emisiones asociadas al procesamiento de materia prima son 20,203.2 kton por año, y las emisiones asociadas al consumo de bioturbosina y subproductos son 19,652.27 kton por año; siendo así que las emisiones netas son 39,913.74 kton por año. Ahora bien, cuando se produce la turbosina se liberan a la atmósfera 56,952 kton, en el año 2018. Por lo que la producción de bioturbosina a partir de biomasa disminuye 29.92% de las emisiones liberadas a la atmósfera por su consumo.

Tabla 13. Producción y distribución de hidrógeno renovable a cada planta de procesamiento de bioturbosina en el escenario V

Planta de procesamiento	Valor (toneladas)
COAHUILA	0.37
CHIHUAHUA	136,673.27
DURANGO	572,420.24
JALISCO	70,227.37
EDO. DE MÉXICO	130,927.78

MICHOACÁN	25.01
YUCATÁN	168,902.65
ZACATECAS	50,945.03
Total HR Producido	1,130,121.72

Una representación esquemática de esta solución se presenta en la Figura 11; en la Figura se observa un equilibrio entre la ganancia y la cantidad de emisiones, y también es el escenario donde más produce bioturbosina. Lo anterior dado que en los demás escenarios la ganancia se compensa con la producción de subproductos y su venta, en este escenario en un solo estado se produce todo el hidrógeno renovable distribuido en las plantas de bioturbosina.

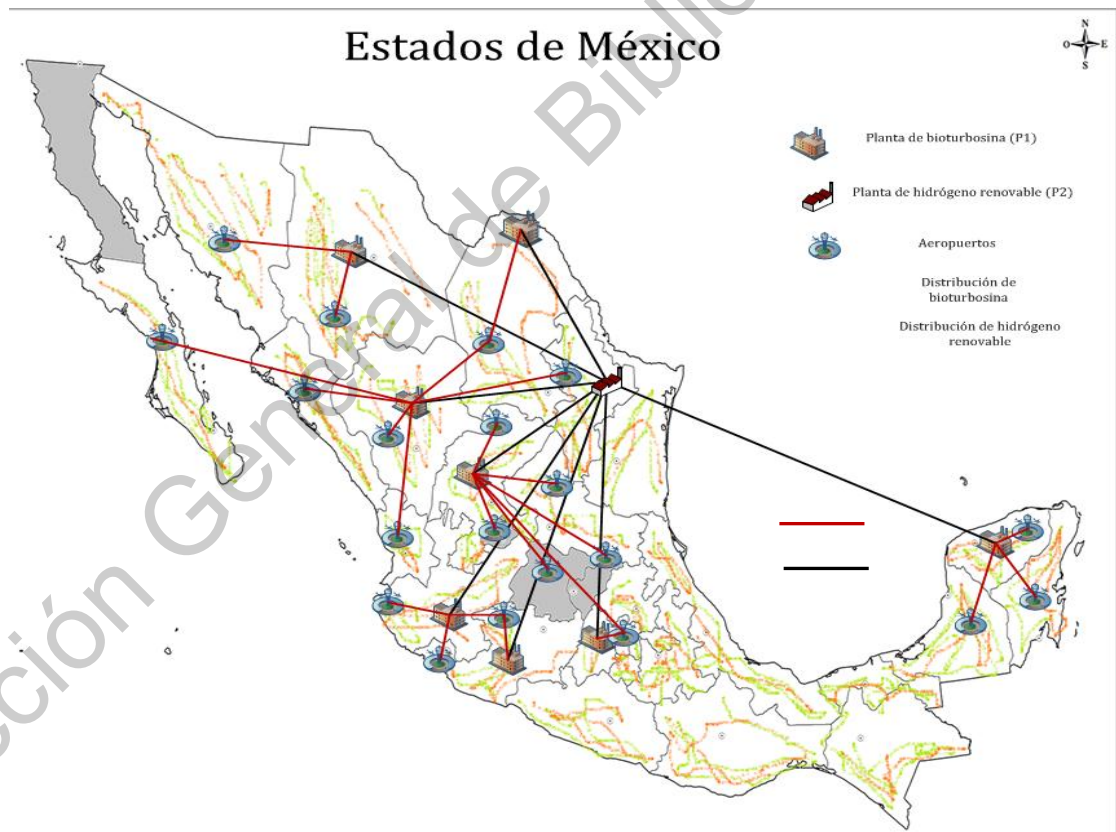


Figura 11. Cadena óptima de suministro del escenario de estudio V

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de hectáreas cultivadas de biomasa por estados, al igual que en toneladas la producción de bioturbosina e hidrógeno

renovable, y los subproductos de valor agregado resultados del proceso de hidrotratamiento como son diesel verde, nafta y gas LP, así como a los mercados que son enviados tanto el biocombustible para aviación como cada uno de los subproductos.

Tabla 14. Resumen de resultados del escenario de estudio V: Curva de Pareto.

Estados Mexicanos	Área cultivada (Ha)	Producción de biomasa (ton)	Producción Bioturbosina (ton)	Producción Hidrógeno Renovable (ton)	Producción Diésel verde (ton)	Producción LPG (ton)	Producción Nafta (ton)	Mercado (ton/año)
BAJA CALIFORNIA SUR								
Palma de aceite	70.00	105.00						
Higuerilla	1,930.00	20,265.00						
CAMPECHE								
Palma de aceite	3,857.00	35,484.40						
Higuerilla	2,894.30	3,473.16						
COAHUILA			6,103.06		0.02	0.13		Coahuila
Camelina	6.00	659.62						
Higuerilla	1,237.10	12,371.00						
COLIMA								
Jatropha Curcas	408.00	723.03						
CHIAPAS								
Palma de aceite	1,571.80	28,740.64						
Higuerilla	34,215.05	749.20						
CHIHUAHUA			431,412.66		495.65	422.42	1,314.67	Chihuahua
Higuerilla	1,228.20	219,955.48						Sonora
CD. DE MÉXICO								
Palma de aceite	268,238.40	7,521.84						
Higuerilla	8,357.60	4,602.43						
DURANGO			1,140,964.42		148.30	585.07	1,117.40	Durango Baja California Sur
Camelina	80.00	282.48						Coahuila Nayarit
Higuerilla	6,482.30	935,011.00						Nuevo León Sinaloa
GUERRERO								
Higuerilla	853,501.10	41,511.50						
HIDALGO								
Camelina	8,041.43	1,665.00						
Palma de aceite	16,482.30	68,030.53						
Higuerilla	333.00	3,737.56						
JALISCO			898,020.07		3,120.49	356.45	77.44	Jalisco
Camelina	10.00	526.94						Colima
Palma de aceite	176.00	3.46						Michoacán
Higuerilla	10,802.20	737,746.00						
EDO. DE MÉXICO			935,609.92		9,703.70	288.75	9,950.14	Cd. De México
Camelina	93,454.10	907.39						

Palma de aceite	113,746.00	24,819.17						
Higuerilla	226.00	839,893.00						
MICHOACÁN			11,812.14		1.70	10.23		Michoacán
Higuerilla	615,321.30	411,955.20						
MORELOS								
Higuerilla	411,955.20	2,690.43						
NAYARIT								
Higuerilla	7,775.80	3,662.30						
NUEVO LEÓN								
Jatropha Curcas	289,527.00	1,302,871.50		1,130,121.72				
Higuerilla	3,662.30	3,531.40						
OAXACA								
Higuerilla	3,531.40	3,131.49						
PUEBLA								
Jatropha Curcas	793.00	1,680.70						
Higuerilla	3,684.10	28,324.20						
QUINTANA ROO								
Higuerilla	28,324.20	2,216.19						
SAN LUIS POTOSÍ								
Palma de aceite	3,633.10	917.60						
Higuerilla	740.00	334.20						
SINALOA								
Higuerilla	334.20	48,321.00						
SONORA								
Higuerilla	74,832.10	24,834.75						
TABASCO								
Palma de aceite	3,311.30	21,625.09						
Higuerilla	9,526.47	1,261.50						
TAMAULIPAS								
Camelina	1,261.50	596.17						
Palma de aceite	8,871.10	5,411.37						
Higuerilla	9,580.77	18,203.40						
TLAXCALA								
Camelina	28,446.20	18,490.03						
Higuerilla	9.00	34.20						
VERACRUZ								
Palma de aceite	7,002.00	22,756.50						
Higuerilla	450,017.70	337,513.28						
YUCATÁN			280,537.29		5,012.97	414.32	643.36	Yucatán
Higuerilla	267,741.20	267,741.20						Campeche Quintana Roo
ZACATECAS			453,036.63		575.55	290.18	2,167.70	Zacatecas Aguascalientes Cd. De México
Higuerilla	947,113.10	805,046.14						Guanajuato Querétaro San Luis Potosí
Total	4,604,341.92	6,321,934.65	4,157,496.19	1,130,121.72	19,058.38	2,367.54	15,270.70	

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propuso un enfoque de optimización para la cadena de suministro asociada a la producción de una bioturbosina totalmente renovable; dado que se usa biomasa tanto para la producción de bioturbosina como del hidrógeno necesario para su producción. El modelo incorporó varios elementos, incluyendo la selección óptima de las fuentes de materia prima, sitios de cultivo y la localización tanto de las plantas para la producción de bioturbosina y subproductos como las de producción de hidrógeno renovable; además, considera la tecnología de hidroprocesamiento, la cual es actualmente la más utilizada para la producción de este tipo de biocombustible, con un rendimiento hasta del 36% a bioturbosina. El modelo consideró la distribución óptima de todos los materiales a través de la cadena de suministro, contemplando la logística (transporte terrestre) y las diferentes distancias requeridas entre cada uno de los eslabones que la conforman. Dos funciones objetivo fueron consideradas simultáneamente, incluyendo la maximización de la ganancia y la minimización de las emisiones de dióxido de carbono asociadas, de las que se le dio mayor relevancia para la toma de decisiones a la maximización del beneficio económico.

El caso de estudio seleccionado fue el suministro de bioturbosina en la red de aeropuertos de México y su excedente exportado al mercado internacional. Para ello se desarrolló un modelo determinista que incluía parámetros de precio y costos para considerar diferentes escenarios de estudios y condiciones y que influyeran en la satisfacción de la demanda de este biocombustible. Los resultados muestran que en el mejor escenario se obtiene una ganancia anual de \$337,862,932.17 MXN. De los 32 estados se produce biomasa en 26, mientras que en los estados de Chiapas, Chihuahua, Durango, Michoacán, Nayarit, Veracruz, Yucatán, Zacatecas, Guerrero, Jalisco y Edo. de México se produce la bioturbosina y en los 3 últimos también se produce el hidrógeno renovable, supliendo la demanda local del biocombustible. Adicionalmente, la producción de bioturbosina a partir de biomasa disminuye en 27.6 % las emisiones liberadas a la

atmósfera, en comparación con la turbosina de origen fósil. Además, en todos los escenarios de estudio se encontró que el factor más importante para la cadena de suministro está asociado con los costos de las materias primas y los costos de instalación de la infraestructura necesaria para la producción de hidrógeno renovable y bioturbosina, debido a que aún las tecnologías utilizadas para su fabricación no están lo suficientemente maduras, para su implementación a gran escala en México, al igual que la competencia con alimentos y las dimensiones en cuanto a uso de suelo y recursos naturales para la producción de biomasa a gran escala de cultivos energéticos, no cuenta con los incentivos económicos y estudios necesarios para su generación en el país. Los resultados sugieren instalar plantas de procesamiento distribuidas a lo largo del territorio, donde se produzca la mayor cantidad de biomasa; y, además, exista alguna infraestructura petrolera que pueda adaptarse como biorefinería para así disminuir costos de capacidad instalada y transporte. Las mejores materias primas fueron Higuierilla y Palma de aceite mientras que la *Jatropha curcas* fue la peor opción. Finalmente, una solución muy atractiva desde los puntos de vista económico y ambiental fue determinada a través de la aplicación del enfoque propuesto para el caso de estudio presentado.

REFERENCIAS

- [1] OACI, "La Aviación y el Medio Ambiente," Revista de la OACI, Vol. 68, no. 9, p. 40, 2017.
- [2] C. Alberto García Bustamante and O. Masera Cerutti, *estado del arte de la bioenergía en México*, pp. 1-156. 2016.
- [3] Á. M. Wilches Flórez, "Biocombustibles: ¿son realmente amigables con el medio ambiente?," *Rev. Colomb. Bioética*, vol. 6, no. 1, pp. 89-102, Nov. 2015.
- [4] J. Yang, Z. Xin, Q. (Sophia) He, K. Corscadden, and H. Niu, "An overview on performance characteristics of bio-jet fuels," *Fuel*, vol. 237. Elsevier Ltd, pp. 916–936, 01-Feb-2019.
- [5] C. M. Francisco Javier Pacheco Román Colaboradores en I Claudia Rivera Villa M en I Gabriela Matzallani Gómez Alvarado M en C Martha Elena Padilla Reyes Diseño Editorial Lic Carlos Alberto Torres de Loera and M. I. en Ernesto Gabriel Hernández Montoya, "Reporte de Inteligencia Tecnológica Bioturbosina 2 Información General del Proyecto Responsable del reporte M en Información del Cliente Entidad solicitante: Fondo Sectorial CONACYT-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética", pp 1-92, 2018.
- [6] P. J. Coldwell *et al.*, "Mapa de Ruta Tecnológica Bioturbosina 2, Secretaría de Energía", pp. 1-80, 2018.[7] IATA, "La IATA se marca como objetivo transportar mil millones de pasajeros en vuelos con biocombustibles en 2025," , p. 5, Report on Alternative Fuels. Disponible: <https://www.iata.org/publications/Documents/2015-report-alternative-fuels.pdf>. [Consultado: 02-Aug-19]
- [8] N. Yilmaz and A. Atmanli, "Sustainable alternative fuels in aviation," *Energy*, vol. 140, pp. 1378–1386, Dec. 2017.
- [9] J. E. Santibañez-Aguilar, G. Guillen-Gosálbez, R. Morales-Rodriguez, L. Jiménez-Esteller, A. J. Castro-Montoya, and J. M. Ponce-Ortega, "Financial Risk Assessment and Optimal Planning of Biofuels Supply Chains under Uncertainty," *Bioenergy Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 1053–1069, Dec. 2016.
- [10] W. C. Wang and L. Tao, "Bio-jet fuel conversion technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53. Elsevier Ltd, pp. 801–822, 01-Jan-2016.
- [11] I. Sepúlveda González, "Bioturbosina. Producción de cultivos energéticos para la aviación comercial* Jet Biofuel. Production of energy-related crops for commercial aircraft", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Vol. 6, No. 9, pp. 579 - 594, 2015.
- [12] Y. Li, T. Brown, and G. Hu, "Optimization Model for a Thermochemical Biofuels Supply Network Design," *J. Energy Eng.*, vol. 140, no. 4, p. 04014004, Dec. 2014.

- [13] C. Lu, "When will biofuels be economically feasible for commercial flights? Considering the difference between environmental benefits and fuel purchase costs," *J. Clean. Prod.*, vol. 181, pp. 365–373, Apr. 2018.
- [14] J. E. Santibañez-Aguilar, J. M. Ponce-Ortega, J. B. González-Campos, M. Serna-González, and M. M. El-Halwagi, "Synthesis of distributed biorefining networks for the value-added processing of water hyacinth," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 284–305, Feb. 2013.
- [15] H. An, "Optimization And Simulation For Designing The Supply Chain Of The Cellulosic Biofuel Industry ", Thesis Industrial Engineering, Texas A&M University 2013.
- [16] D. Chiaramonti, M. Prussi, M. Buffi, and D. Tacconi, "Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels," *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 767–774, Dec. 2014.
- [17] A. Romero Izquierdo, A. G. De La Cruz, and C. Gutiérrez-Antonio, "Bioturbosina: retos y oportunidades," *Revista Ciencia*, p. 9, 2016.
- [18] C. Zhang, X. Hui, Y. Lin, and C.-J. Sung, "Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: Progress, challenges, and opportunities," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 120–138, Feb. 2016.
- [19] F. Xie and Y. Huang, "Sustainable Biofuel Supply Chain Planning and Management under Uncertainty," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2385, no. 1, pp. 19–27, Jan. 2013.
- [20] A. Dufey, International Institute for Environment and Development., and International Institute for Environment and Development. Grupo Mercados Sustentables., *Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable : los grandes temas*. IIED, p.25, 2016.
- [21] S. de Energía, "Prospectiva de Energías Renovables 2016- 2030", reporte, Secretaría de Energía (SENER), p.132, 2016.
- [22] Y. Bai, Y. Ouyang, and J. S. Pang, "Biofuel supply chain design under competitive agricultural land use and feedstock market equilibrium," *Energy Econ.*, vol. 34, no. 5, pp. 1623–1633, Sep. 2012.
- [23] CEMIE-Bio, "Mapa de Ruta Tecnológica Bioturbosina, Secretaría de Energía (SENER)," p. 80, México, 2017.
- [24] IATA, "-Los biocombustibles son una prioridad para la industria aeronáutica", Comunicado No. 56, IATA, p. 4 .Disponible: IATA 2011 Report on Alternative Fuels: <https://www.iata.org/publications/Documents/2011-report-alternative-fuels.pdf> [Consultado: 02-Aug-19]
- [25] C. Gutiérrez-Antonio, M. L. Soria Ornelas, F. I. Gómez-Castro, and S. Hernández, "Intensification of the hydrotreating process to produce renewable

aviation fuel through reactive distillation,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 124, pp. 122–130, Feb. 2018.

[26] C. Gutiérrez-Antonio, F. I. Gómez-Castro, J. A. de Lira-Flores, and S. Hernández, “A review on the production processes of renewable jet fuel,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 709–729, Nov. 2017.

[27] IPCC, “Resumen ejecutivo - los impactos del calentamiento global de 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales”, Quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC, p.8, 2016.

[28] EOI.-Escuela de organización Industrial, “Biocarburantes- Combustibles sostenibles en aviación.”[online]. Disponible: <https://www.eoi.es/blogs/merme/biocarburantes-combustibles-sostenibles-en-aviacion-2/> [Consultado: 15 -Aug-2019].

[29] “SENER | Sistema de Información Energética.” [Online]. Disponible: http://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=cuadro&cvecua=DIPS_PP_C54_E. [Consultado: 08-Aug-2019].

[30] N. Aguilar-Rivera, “A framework for the analysis of socioeconomic and geographic sugarcane agro industry sustainability,” *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 66, pp. 149–160, Jun. 2019.

[31] R. Babazadeh, “Optimal design and planning of biodiesel supply chain considering non-edible feedstock,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75. Elsevier Ltd, pp. 1089–1100, 2017.

[32] V. Masson-Delmotte *et al.*, “Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty Summary for Policymakers Edited by Science Officer Science Assistant Graphics Officer Working Group I Technical Support Unit.” [online]. Disponible: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf [Consultado: 5-Agu-2019]

[33] CEFMONU, Comité ejecutivo del fondo multilateral de las naciones unidas, “Informe De Expertos Sobre Los Requisitos Actuales Y Futuros P Ara Recoger Y Eliminar Las Sao No Reutilizables Y No Deseadas En Lo S Países Que Operan Al Amparo Del Artículo 5 (Seguimiento A La Decisión 47/52) Naciones Unidas”, UNEP/OzL.Pro/ExCom/48/42 1. p. 144, Montreal, 2016.

[34] J. Ren *et al.*, “Life cycle energy and CO2 emission optimization for biofuel supply chain planning under uncertainties,” *Energy*, vol. 103, pp. 151–166, 2016.

[35] L. M. Tapia Barrera, J. Acevedo Chedid, H. Araméndiz Tatis, and J. Ararat Herrera, “La sostenibilidad en el diseño de cadenas de suministro de biocombustibles,” *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 14, no. 26, pp. 57–72, 2015.

- [36] J. Lechuga and F. García de la Cruz, “Biocombustibles: el debate internacional y el caso de México,” *Ensayos Econ.*, no. 5, pp. 1–13, 2010.
- [37] M. Kousoulidou and L. Lonza, “Biofuels in aviation: Fuel demand and CO₂ emissions evolution in Europe toward 2030,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 46, pp. 166–181, Jul. 2016.
- [38] P. J. Coldwell and S. De Energía, “Informe Tres, Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría De Energía-Sustentabilidad Energética.” [online]. Disponible: <http://proyctofse.mx/>[Consultado: 31-Jul-19]
- [39] M. Wang *et al.*, “Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective,” *Progress in Energy and Combustion Science*. Elsevier Ltd, pp. 31–49, 01-Sep-2019.
- [40] V. Calemme, S. Peratello, and C. Perego, “Hydroisomerization and hydrocracking of long chain n-alkanes on Pt/amorphous SiO₂-Al₂O₃ catalyst,” *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 190, no. 1–2, pp. 207–218, Jan. 2000.
- [41] D. Chiaramonti, M. Prussi, M. Buffi, and D. Tacconi, “Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels,” *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 767–774, Dec. 2014.
- [42] C. Gutiérrez-Antonio, A. G. Romero-Izquierdo, F. Israel Gómez-Castro, and S. Hernández, “Energy Integration of a Hydrotreatment Process for Sustainable Biojet Fuel Production,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, no. 29, pp. 8165–8175, Jul. 2016.
- [43] “Jatropha (Jatropha spp.)* | Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas | Gobierno | gov.mx.” [Online]. Disponible: <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/jatropha-jatropha-spp>. [Consultado: 31-Jul-2019].
- [44] “Datos Abiertos de México - Plan de Apertura Institucional de INIFAP.” [Online]. Disponible: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/plan-de-apertura-institucional-de-inifap>. [Consultado: 31-Jul-2019].
- [45] “Higuerilla, planta convertida en aceite | Fideicomiso de Riesgo Compartido | Gobierno | gov.mx.” [Online]. Disponible: <https://www.gob.mx/firco/articulos/higuerilla-planta-convertida-en-aceite>. [Consultado: 31-Jul-2019].
- [46] “Palma De Aceite, Mexicana planeación agrícola nacional,” [Online]. Disponible: <https://www.gob.mx/sagarpa/documentos/planeacion-agricola-nacional-2017-2030?state=published>. [Consultado: 05-Aug-19].
- [47] C. A. Scaldaferri and V. M. D. Pasa, “Hydrogen-free process to convert lipids into bio-jet fuel and green diesel over niobium phosphate catalyst in one-step,” *Chem. Eng. J.*, pp. 98–109, Aug. 2019.
- [48] J. R. Seay and F. F. Badurdeen, “Current trends and directions in achieving

sustainability in the biofuel and bioenergy supply chain,” *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 6. Elsevier Ltd, pp. 55–60, 2014.

[49] L. Hudson, A. Jefferson, A. Bauen, and L. Nattrass, “Sustainable Aviation: A UK Roadmap for Sustainable Aviation Fuels,” *Biofuels Aviat.*, pp. 315–337, Jan. 2016.

[50] M. Guo, W. Song, and J. Buhain, “Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42. Elsevier Ltd, pp. 712–725, 2015.

[51] S. Domínguez-García, C. Gutiérrez-Antonio, J. A. De Lira-Flores, J. M. Ponce-Ortega, and M. M. El-Halwagi, “Strategic Planning for the Supply Chain of Aviation Biofuel with Consideration of Hydrogen Production,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 56, no. 46, pp. 13812–13830, Nov. 2017.

[52] DOF *et al.*, “Ley De Promoción y Desarrollo De Los Bioenergéticos,” Cd. de México, pp. 1-12, 2008.

[53] T. Radich, U.S. Energy Information Administration . “The Flight Paths for Biojet Fuel,” [online]. Disponible: www.eia.gov [consultado:18-Aug-2019].

[54] F. A. A. FAA, “Sustainable Alternative Jet Fuels,” 2019. [Online]. Disponible: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/alternative_fuels/[Consultado:18-Aug-2019].

[55] P. Gegg, L. Budd, and S. Ison, “The market development of aviation biofuel: Drivers and constraints,” *J. Air Transp. Manag.*, vol. 39, pp. 34–40, Jul. 2014.

[56] N. E. Luongo, “El Histórico Acuerdo de la OACI Sobre Aviación Internacional y Cambio Climático. Análisis de un Éxito Presente y de sus Desafíos Futuros (ICAO’s Historic Agreement on Aviation and Climate Change. An Analysis of the CORSIA Agreement and Its Present and Fut,” *SSRN Electronic Journal*, Elsevier B.V. Disponible: [10.2139/ssrn.2944694/](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2944694/) Apr. 2017, [consultado: 14-Aug-19].

[57] SCT, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Suministro de combustible más competitivo y eficiente, reto ante el creciente desarrollo de la aviación.”, comunicado 19, p. 6, 11 de Abril 2018, México.

[58] Luongo. N, “El histórico acuerdo de la OACI sobre aviación internacional y cambio climático. Análisis de un éxito presente y de sus desafíos futuros.”, Disponible: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2944694,](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2944694/) [Consultado: [14 -Aug-19].

[59] J. E. Santibañez-Aguilar, J. B. González-Campos, J. M. Ponce-Ortega, M. Serna-González, and M. M. El-Halwagi, “Optimal planning of a biomass conversion system considering economic and environmental aspects,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, no. 14, pp. 8558–8570, Jul. 2011.

- [60] J. A. Aranda Pinilla and J. A. Orjuela Castro, "Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles TT - Una revisión de la literatura Multiobjective optimization in biofuel supply chain management. A review of the literature," *Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 21–47, 2015.
- [61] UPeU. Merino, Estrada. A, "Gestión de la Cadena de Suministro," *Manual*, p. 471, Escuela Técnica superior de ingeniería, España, 2014.
- [62] M. A. Rendon-Sagardi, C. Sanchez-Ramirez, G. Cortes-Robles, G. Alor-Hernandez, and M. G. Cedillo-Campos, "Dynamic analysis of feasibility in ethanol supply chain for biofuel production in Mexico," *Appl. Energy*, vol. 123, pp. 358–367, Jun. 2014.
- [63] A. Correa Espinal, R. Andrés, and G. Montoya, "Information Technologies In Supply Chain Management," *Año*, vol. 76, pp. 37–48, 2014.
- [64] J. Maximiliano Huacuz. Villamar, "La biomasa en la transición energética de México," *Boletín IIE*, p. 8, Junio - 2015.
- [65] J. E. Santibañez-Aguilar, J. B. González-Campos, J. M. Ponce-Ortega, M. Serna-González, and M. M. El-Halwagi, "Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives," *J. Clean. Prod.*, vol. 65, pp. 270–294, 2014.
- [66] D. Yue, F. You, and S. W. Snyder, "Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 66, pp. 36–56, Jul. 2014.
- [67] Y. Bai, Y. Ouyang, and J. S. Pang, "Enhanced models and improved solution for competitive biofuel supply chain design under land use constraints," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 249, no. 1, pp. 281–297, Feb. 2016.
- [68] W. C. Wang and L. Tao, "Corrigendum to 'Bio-jet fuel conversion technologies' [Renewable and Sustainable Energy Reviews 53 (2016) 801–822](S1364032115009867)(10.1016/j.rser.2015.09.016)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79. Elsevier Ltd, p. 1556, 01-Nov-2017.
- [69] J. Ren, L. Dong, L. Sun, M. E. Goodsite, S. Tan, and L. Dong, "Life cycle cost optimization of biofuel supply chains under uncertainties based on interval linear programming," *Bioresour. Technol.*, vol. 187, pp. 6–13, Jul. 2015.
- [70] J. J. Reimer and X. Zheng, "Economic analysis of an aviation bioenergy supply chain," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77. Elsevier Ltd, pp. 945–954, 2017.
- [71] J. Ren, "Life cycle aggregated sustainability index for the prioritization of industrial systems under data uncertainties," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 113, pp. 253–263, May 2018.
- [72] J. E. Santibañez-Aguilar, J. B. González-Campos, J. M. Ponce-Ortega, M.

Serna-González, and M. M. El-Halwagi, “Optimal Planning of a Biomass Conversion System Considering Economic and Environmental Aspects,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, no. 14, pp. 8558–8570, 2011.

[73] E. C. Stephens and A. D. Jones, “Agricultural systems research and global food security in the 21st century: An overview and roadmap for future opportunities,” *Agric. Syst.*, vol. 163, pp. 1–6, Jun. 2018.

[74] M. Jesús Saénz, M^a Pilar Lambán, Carolina García, Jesús Royo, “Buenas prácticas en la gestión de la cadena de suministro: Estudio Empírico,” Documento de trabajo 33, p. 57. U. de Zaragoza, Fundación Economía Aragonesa FUNDEAR, 2016.

[75] F. Salazar, J. Cavazos, and J. L. Martínez, “Metodología basada en el Modelo de Referencia para Cadenas de Suministro para Analizar el Proceso de producción de Biodiesel a partir de Higuierilla Methodology based on the Supply Chain Operations Reference Model to Analyze the Production Process of Biodi,” vol. 23, no. 1, pp. 47–56, 2012.

[76] M. Eskandarpour, P. Dejax, J. Miemczyk, and O. Péton, “Sustainable supply chain network design :,” *Omega*, vol. 54, pp. 11–32, 2015.

[77] “Cierre de la producción agrícola por cultivo.” [Online]. Disponible: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp. [Consultado: 31-Jul-2019].

[78] K. Perea *et al.*, “Feed efficiency phenotypes in lambs involve changes in ruminal , colonic , and small-intestine-located microbiota 1,” pp. 2585–2592, 2017.

[79] M. Schraven, M. Chen, N. Nesterova, and J. Schoemaker, “Developing a Transnational Biofuels Refueling Infrastructure: EU Biofuels Corridors,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 278–287, Dec. 2012.

[80] C. R. Malwade, H. Qu, B.-G. Rong, and L. P. Christensen, “Conceptual Process Synthesis for Recovery of Natural Products from Plants: A Case Study of Artemisinin from *Artemisia annua*,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52, no. 22, pp. 7157–7169, Jun. 2013.

[81] T. L. Ng and X. Cai, “Relationships between Interdependency, Reliability, and Vulnerability of Infrastructure Systems: Case Study of Biofuel Infrastructure Development,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 20, no. 1, p. 04013008, Mar. 2014.

[82] X. Li, F. Peng, Y. Bai, and Y. Ouyang, “Effects of Disruption Risks on Biorefinery Location Design: Discrete and Continuous Models,” *Energies*, vol. 8, no. 2., pp. 1468- 1486, Apr .2014.

[83] M. M. M. Chávez, W. Sarache, and Y. Costa, “Towards a comprehensive model of a biofuel supply chain optimization from coffee crop residues,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 116, pp. 136–162, Aug. 2018.

- [84] A. M. El-Halwagi, C. Rosas, J. M. Ponce-Ortega, A. Jiménez-Gutiérrez, M. S. Mannan, and M. M. El-Halwagi, "Multiobjective optimization of biorefineries with economic and safety objectives," *AIChE J.*, vol. 59, no. 7, pp. 2427–2434, Jul. 2013.
- [85] S. Giarola, A. Zamboni, and F. Bezzo, "Spatially explicit multi-objective optimisation for design and planning of hybrid first and second generation biorefineries," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 35, no. 9, pp. 1782–1797, Sep. 2011.
- [86] A. Bernardi, S. Giarola, and F. Bezzo, "Spatially Explicit Multiobjective Optimization for the Strategic Design of First and Second Generation Biorefineries Including Carbon and Water Footprints," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52, no. 22, pp. 7170–7180, Jun. 2013.
- [87] M. A. F. D. Moraes, A. M. Nassar, P. Moura, R. L. V. Leal, and L. A. B. Cortez, "Jet biofuels in Brazil: Sustainability challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 716–726, Dec. 2014.
- [88] J. Köhler, R. Walz, F. Marscheder-Weidemann, and B. Thedieck, "Lead markets in 2nd generation biofuels for aviation: A comparison of Germany, Brazil and the USA," *Environ. Innov. Soc. Transitions*, vol. 10, pp. 59–76, 2014.
- [89] S. Domínguez-García, C. Gutiérrez-Antonio, J. A. De Lira-Flores, and J. M. Ponce-Ortega, "Optimal planning for the supply chain of biofuels for aviation in Mexico," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, no. 5, pp. 1387–1402, 2017.
- [90] S. Domínguez-García, C. Gutiérrez-Antonio, J. A. De Lira-Flores, J. M. Ponce-Ortega, and M. M. El-Halwagi, "Strategic Planning for the Supply Chain of Aviation Biofuel with Consideration of Hydrogen Production," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 56, no. 46, pp. 13812–13830, Nov. 2017.
- [91] M. Y. Gregorio-Gutiérrez, P. E. Murillo-Alvarado, J. M. Ponce-Ortega, and M. M. El-Halwagi, "Optimization Of The Supply Chain To Obtain Biojet Fuel From The *Bigelovii* Salicornia," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 15, no. 1, pp. 93–110, Sep. 2018.
- [92] M. G. Aca-Aca, E. Campos González, O. Sánchez-Daza, M. T. López-Arenas, and A. M. Sales-Cruz, "Estimación de propiedades termodinámicas de los compuestos involucrados en la producción de biodiesel." *Sociedad mexicana de ciencia y tecnología de superficies y materiales*. vol. 22, no. 3, pp. 15-19, Sep. 2009.

ANEXO 1. CÓDIGO DEL MODELO MATEMÁTICO PROGRAMADO EN GAMS

\$TITLE Producción de Bioturbosina e Hidrógeno Renovable

Option OPTCA=0.001;

Option OPTCR=0.01;

Option MIP = CPLEX;

Option LIMROW=1000;

Option LIMCOL=1000;

Producción de Bioturbosina e hidrógeno renovable en cualquiera de los estados de México, para su venta en todo México y en el exterior

**/*/ sitios de cultivo ESTADOS MEXICANOS Incluyendo Ciudad de México /Aguascalientes,Bajacalorte,Bajacalsur,Campeche,Cdmx,Coahuila,Colima,Chiapas,Chihuahua,Durango,Guanajuato,Guerrero,Hidalgo,Jalisco,Emexico,Michoacan,Morelos,Nayarit,Nuevoleon,Oxaca,Puebla,Queretaro,Quintanaroo,Sanluis,Sinaloa,Sonora,Tabasco,Tamaulipas,Tlaxcala,Veracruz,Yucatan,Zacatecas/*

**/A= Se Incluyen 32 Aeropuertos A Nivel Nacional Y Un Mercado Internacional*

**/I= Corresponde a los lugares donde se pueda sembrar cada materia prima a lo largo del territorio nacional*

**/P1= Corresponde a los lugares donde sea posible instalar una planta para producción de bioturbosina posibilidad en los 32 estados del país*

**/P2= Corresponde a los lugares donde se pueda instalar una planta de producción de hidrógeno renovable posibilidad en los 32 estados del país*

**/M= 1=Jatropha, 2=Camelina, 3=Palma De Aceite, 4=Higuerilla*

**/R= 1=Hidrotratamiento*

**/RHR= 1=Gasificación De Biomasa, 2=Pirolisis De Biomasa, 3=Fermentación De Biomasa*

**/J= 1=Diesel Verde, 2=Biogás (LPG), 3=Nafta*

SETS

Ubicación de los mercados de bioturbosina y subproductos

A /1*33/

Sitios de cultivo de materia prima

I /1*32/

Ubicación de las plantas para la producción de bioturbosina

P1 /1*32/

Ubicación de las plantas de producción de hidrógeno Renovable

P2 /1*32/

M	Tipo de materia prima utilizada para la producción de bioturbosina e hidrógeno Renovable /1*4/
R	Ruta de procesamiento para producir bioturbosina /1/
RHR	Ruta de procesamiento para producir hidrógeno renovable /1*3/
J	Tipo de subproducto /1*3/;

TABLE	AD(I,M)	ÁREA DISPONIBLE PARA EL CULTIVO DE MATERÍA PRIMA
TABLE	AAU(I,M)	ÁREA ACTUAL USADA PARA EL CULTIVO DE MATERÍA PRIMA
PARAMETER	BMAX(P1)	CAPACIDAD MÁXIMA DE CADA PLANTA P1 PARA PRODUCIR BIOTURBOSINA
PARAMETER	BMIN(P1)	CAPACIDAD MÍNIMA DE CADA PLANTA P1 PARA PRODUCIR BIOTURBOSINA
PARAMETER	CBB(P1)	COSTO BASE DE INSTALACIÓN DE LAS PLANTAS DE BIOTURBOSINA
PARAMETER	CBHR(P2)	COSTO BASE DE INSTALACIÓN DE LAS PLANTAS DE HIDRÓGENO RENOVABLE
TABLE	CRB(P1,M,R)	COSTO BASE DE INSTALACIÓN DE LA RUTA DE HIDROTRATAMIENTO EN LAS PLANTAS DE BIOTURBOSINA
TABLE	CRHR(P2,M,RHR)	COSTO BASE DE INSTALACIÓN DE CADA RUTA DE PROCESAMIENTO EN LAS PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE
TABLE	CDB(P1,M,R)	COSTO DE DIMENSIONAMIENTO DE LA RUTA DE HIDROTRATAMIENTO EN LAS PLANTAS DE BIOTURBOSINA
TABLE	CDHR(P2,M,RHR)	COSTO DE DIMENSIONAMIENTO DE CADA RUTA DE PROCESAMIENTO EN LAS PLANTAS DE HIDRÓGENO RENOVABLE
PARAMETER	DB(A)	DEMANDA DE BIOTURBOSINA EN LOS MERCADOS NACIONALES
PARAMETER	DI(P1)	DEMANDA DE BIOTURBOSINA EN LOS MERCADO INTERNACIONALES
PARAMETER	DSMAX(A,J)	DEMANDA MÁXIMA DE CADA SUBPRODUCTO EN LOS MERCADOS
TABLE	FROUTEMIN(P1,M,R)	FLUJO MÍNIMO DE MATERIA PRIMA PARA EL HIDROTRATAMIENTO DE LA BIOTURBOSINA
TABLE	FROUTEMAX(P1,M,R)	FLUJO MÁXIMO DE MATERIA PRIMA PARA HIDROTRATAMIENTO DE LA BIOTURBOSINA
TABLE	FMROUTEMIN(P2,M,RHR)	FLUJO MÍNIMO DE MATERIAS PRIMAS POR RUTA DE PROCESAMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE
TABLE	FMROUTEMAX(P2,M,RHR)	FLUJO MÁXIMO DE MATERIAS PRIMAS POR RUTA DE PROCESAMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE
PARAMETER	PHRMIN(P2)	CAPACIDAD MÍNIMA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE
PARAMETER	PHRMAX(P2)	CAPACIDAD MÁXIMA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE
TABLE	UCFEEDSTOCK(I,M)	COSTO UNITARIO DE LA MATERIA PRIMA M CULTIVADA EN EL SITIO I

TABLE UCBTPROCESSING(P1,M,R) COSTO UNITARIO DE PROCESAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA M EN LA PLANTA DE BIOTURBOSINA P1 A TRAVÉS DE LA RUTA DE HIDROTRATAMIENTO
TABLE UCHRPROCESSING(P2,M,RHR) COSTO UNITARIO DE PROCESAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA M EN LA PLANTA DE HR P2 A TRAVÉS DE LA RUTA RHR
TABLE UCTMB(I,M,P1) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA A LAS PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA
TABLE UCTMHR(I,M,P2) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA A LAS PLANTAS DE HIDRÓGENO RENOVABLE
TABLE UCTB(P1,A) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE BIOTURBOSINA A LOS "MERCADOS"
TABLE UCTS(P1,J,A) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE SUBPRODUCTO J A LOS "MERCADOS A"
TABLE UCTSI(J,A) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE SUBPRODUCTO J IMPORTADO
PARAMETER UCTBI(A) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE BIOTURBOSINA IMPORTADA
PARAMETER UCTBE(P1) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE BIOTURBOSINA EXPORTADA
TABLE UCTSE(P1,J) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE SUBPRODUCTO J EXPORTADO DESDE LA PLANTA DE BIOTURBOSINA P1
TABLE UCTHRB(P2,P1) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE HIDRÓGENO RENOVABLE ENVIADO A LAS PLANTAS DE BIOTURBOSINA
PARAMETER UCBI COSTO UNITARIO DE LA BIOTURBOSINA EN EL MERCADO INTERNACIONAL
PARAMETER UCSI(J) COSTO UNITARIO DEL SUBPRODUCTO J EN EL MERCADO INTERNACIONAL
PARAMETER UCBIJETFUEL(A) PRECIO UNITARIO DE LA BIOTURBOSINA EN EL "MERCADO" A
TABLE UCBYPRODUCT(J,A) PRECIO UNITARIO DEL SUBPRODUCTO J EN EL "MERCADO" A
TABLE ALFA(M,R,J) FACTOR DE CONVERSIÓN DE LA MATERIA PRIMA M AL SUBPRODUCTO J
TABLE BETHA(I,M) FACTOR DE RENDIMIENTO DEL CULTIVO M EN EL SITIO I
TABLE GAMA(P2,M,RHR) FACTOR DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA M A HIDRÓGENO RENOVABLE EN EL SITIO P2 POR LA RUTA RHR
TABLE PHI(M,R) FACTOR DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA M A BIOTURBOSINA A TRAVÉS DE LA RUTA R
TABLE IPSILON(M,R,P1) COEFICIENTE ESTEQUIOMETRICO PARA EL CONSUMO DE HIDRÓGENO EN LA CONVERSIÓN DE LA BIOMASA M A BIOTURBOSINA
TABLE CMP(I,M) TONELADAS DE CO2 CAPTADAS POR HECTARA CULTIVADA DE MATERIA PRIMA M EN EL SITIO I
PARAMETER BTPC(A) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE BIOTURBOSINA CONSUMIDA
PARAMETER TBMI TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR EL CONSUMO DE TONELADAS DE BIOTURBOSINA EXPORTADA
TABLE PMP(P1,M,R) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE MATERIA PRIMA M PROCESADA PARA PRODUCIR BIOTURBOSINA
TABLE PMPHR(P2,M,RHR) TONELADAS DE CO2 POR PROCESAMIENTO DE TONELADA DE

MATERIA PRIMA PARA PRODUCIR HIDRÓGENO RENOVABLE

TABLE SP(J,A) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE SUBPRODUCTO J CONSUMIDO EN EL MERCADO

PARAMETER SSP(J) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR EL CONSUMO DE TONELADAS DE SUBPRODUCTOS EXPORTADOS

TABLE TBT(P1,A) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE BIOTURBOSINA TRANSPORTADA DE LA PLANTA I1 A CUALQUIER MERCADO

TABLE TSP(P1,J,A) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE SUBPRODUCTO J TRANSPORTADO DEL SITIO DE PROCESO A CUALQUIER MERCADO

TABLE TMPB(I,M,P1) PARÁMETRO DE EMISIÓN DE CO2 POR EL TRANSPORTE DE LA MATERIA PRIMA A LAS PLANTAS DE BIOTURBOSINA

TABLE TMPHR(I,M,P2) CO2 PRODUCIDO POR EL TRANSPORTE DE LA MATERIA PRIMA A LAS PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE

PARAMETER TTIN(A) CO2 PRODUCIDO POR EL TRANSPORTE DE BIOTURBOSINA DEL MERCADO INTERNACIONAL AL MERCADO NACIONAL (BIOTURBOSINA IMPORTADA)

TABLE TSIN(J,A) CO2 PRODUCIDO POR EL TRANSPORTE DEL SUBPRODUCTO J DEL MERCADO INTERNACIONAL A LOS MERCADOS NACIONALES (SUBPRODUCTOS IMPORTADOS)

PARAMETER TBNI(P1) CO2 PRODUCIDO POR TRANSPORTE DE BIOTURBOSINA DESDE LA PLANTA P1 HASTA EL MERCADO INTERNACIONAL (BIOTURBOSINA EXPORTADA)

TABLE TSNi(J,P1) CO2 PRODUCIDO POR TRANSPORTE DE SUBPRODUCTOS DESDE LA PLANTA I1 HASTA EL MERCADO INTERNACIONAL (SUBPRODUCTO EXPORTADO)

TABLE THRB(P2,P1) CO2 PRODUCIDO POR TRANSPORTE DE HIDRÓGENO RENOVABLE A LAS PLANTAS DE BIOTURBOSINA

ECUACIONES

** USO DE ÁREAS PARA CULTIVO

EQ1(I,M) *Área de cultivo,*
EQ2(I,M) *Producción de biomasa,*
EQ3(I,M) *Distribución de biomasa,*

** PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE

EQ4(P2,M) *Balance de biomasa que llega a cada planta de hidrógeno renovable,*
EQ5(P2,M) *Balance de biomasa que llega a cada planta de hidrógeno renovable y es procesada en las diferentes rutas,*
EQ6(P2) *Producción de hidrógeno renovable a través de las diferentes rutas de proceso de la biomasa en cada planta p2,*
EQ7(P2) *Distribución de hidrógeno renovable producido en cada planta de bioturbosina,*
EQ8(P1) *Total de hidrógeno renovable suministrado a cada planta de bioturbosina,*

EQ9(P1)	<i>Balance de hidrógeno renovable consumido en cada planta de bioturbosina,</i>
	** PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE BIOTURBOSINA
EQ10(P1,M)	<i>Balance de biomasa que llega a cada planta para producir bioturbosina,</i>
EQ11(P1,M)	<i>Balance de biomasa distribuida en las diferentes rutas en las plantas de bioturbosina,</i>
EQ12(P1)	<i>Producción de bioturbosina en cada planta,</i>
EQ13(P1)	<i>Distribución de bioturbosina producida en cada planta,</i>
	** PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SUBPRODUCTOS PRODUCIDOS EN LAS BIOREFINERÍAS
EQ14(P1,J)	<i>Producción de subproductos en las plantas p1,</i>
EQ15(P1,J)	<i>Distribución de subproductos producidos en cada planta p1,</i>
	** BALANCE EN LOS MERCADOS DE BIOTURBOSINA
EQ16(A)	<i>Balance de bioturbosina que llega los mercados nacionales,</i>
EQ17	<i>Balance de bioturbosina que se envía al mercado internacional,</i>
	** BALANCE EN LOS MERCADOS DE SUBPRODUCTOS
EQ18(J,A)	<i>Balance de subproductos que llegan al mercado nacional,</i>
EQ19(J)	<i>Balance de subproductos que se envían al mercado internacional,</i>
	** RESTRICCIONES DE DISPONIBILIDAD
EQ20(I,M)	<i>Restricción de área de cultivo,</i>
EQ21(A)	<i>Restricciones de demanda de bioturbosina en el mercado nacional,</i>
EQ22	<i>Restricciones de demanda de bioturbosina en el mercado internacional,</i>
EQ23(J,A)	<i>Restricciones de demanda de subproductos,</i>
	** RESTRICCIONES DE DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO
EQ24A(P1)	<i>Activación para las plantas de bioturbosina límite mínimo,</i>
EQ24B(P1)	<i>Activación para las plantas de bioturbosina límite máximo,</i>
EQ25A(P1,M,R)	<i>Activación para las diferentes rutas en las plantas p1 límite mínimo,</i>
EQ25B(P1,M,R)	<i>Activación para las diferentes rutas en las plantas p1 límite máximo,</i>

EQ26A(P2)	<i>Activación para las plantas de hidrógeno renovable límite mínimo,</i>
EQ26B(P2)	<i>Activación para las plantas de hidrógeno renovable límite máximo,</i>
EQ27A(P2,M,RHR)	<i>Activación para las diferentes rutas en las plantas de hidrógeno renovable límite mínimo,</i>
EQ27B(P2,M,RHR)	<i>Activación para las diferentes rutas en las plantas de hidrógeno renovable límite máximo,</i>
	** COSTO DE MATERIA PRIMA Y PROCESAMIENTO
EQ28	<i>Costos de materia prima,</i>
EQ29	<i>Costo de procesamiento en las plantas de bioturbosina,</i>
EQ30	<i>Costo de procesamiento en las plantas de hidrógeno renovable,</i>
EQ31	<i>Costo total de procesamiento,</i>
	** COSTOS DE TRANSPORTE
EQ32	<i>Costo de transporte de la biomasa a las plantas de bioturbosina,</i>
EQ33	<i>Costo de transporte de la biomasa a las plantas de hidrógeno renovable,</i>
EQ34	<i>Costo de transporte de la bioturbosina a los mercados nacionales,</i>
EQ35	<i>Costo de transporte de los subproductos a los mercados nacionales,</i>
EQ36	<i>Costo de transporte de bioturbosina importada desde el mercado internacional,</i>
EQ37	<i>Costo de transporte de los subproductos importados desde el mercado internacional,</i>
EQ38	<i>Costo de transporte de bioturbosina exportada al mercado internacional,</i>
EQ39	<i>Costo de transporte de los subproductos exportados al mercado internacional,</i>
EQ40	<i>Costo de transporte de hidrógeno renovable a las plantas de bioturbosina,</i>
EQ41	<i>Costo total de transporte,</i>
	** COSTOS DE CAPITAL
EQ42	<i>Costo de capital para las plantas de bioturbosina,</i>
EQ42A(P1,M,R)	<i>Restricción para el dimensionamiento de la planta de bioturbosina p1,</i>

EQ43	<i>Costo de capital para las plantas de hidrógeno renovable,</i>
EQ43A(P2,M,RHR)	<i>Restricción para el dimensionamiento de las planta hr p2,</i>
EQ44	<i>Costo de capital total,</i>
	** COSTO DE IMPORTACIÓN BIOTURBOSINA Y SUBPRODUCTOS
EQ45	<i>Costos De Importación,</i>
	** VENTAS
EQ46	<i>Ventas nacionales,</i>
EQ47	<i>Ventas al mercado internacional,</i>
EQ48	<i>Ventas totales,</i>
	** FUNCIÓN OBJETIVO MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA
EQ49	<i>La Ganancia Total,</i>
	** EMISIONES DE CO₂
EQ50	<i>Captura de CO₂ en los cultivos,</i>
EQ51	<i>Emisiones por transporte de materias primas,</i>
EQ52	<i>Emisiones por transporte de hidrogeno renovable,</i>
EQ53	<i>Emisiones por transporte de bioturbosina,</i>
EQ54	<i>Emisiones por transporte de subproductos,</i>
EQ55	<i>Emisiones por procesamiento de materia prima,</i>
EQ56	<i>Emisiones por consumo de bioturbosina total en los mercados,</i>
EQ57	<i>Emisiones por consumo de subproductos en los mercados,</i>
	** FUNCIÓN OBJETIVO AMBIENTAL
EQ58	<i>Las Emisiones Netas De CO₂;</i>
	***** PROGRAMACION DEL MODELO PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA E HIDRÓGENO RENOVABLE
	** DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS DE CULTIVO
EQ1(I,M)..	<i>AC(I,M)=E=AAU(I,M)+ANEW(I,M);</i>
EQ2(I,M)..	<i>PB(I,M)=E=BETHA(I,M)*AC(I,M);</i>
EQ3(I,M)..	<i>PB(I,M)=E=SUM(P1,FMHT(I,P1,M))+SUM(P2,FMHR(I,P2,M));</i>

**** PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE**

EQ4(P2,M).. $FMHRTOTAL(P2,M)=E=SUM(I,FMHR(I,P2,M));$
 EQ5(P2,M).. $FMHRTOTAL(P2,M)=E=SUM(RHR,FMROUTE(P2,M,RHR));$
 $PHR(P2)=E=SUM((M,RHR),FMROUTE(P2,M,RHR)*GAMA(P2,M,RHR));$
 EQ6(P2).. $PHR(P2)=E=SUM(P1,FHRB(P2,P1));$
 EQ7(P2).. $HRB(P1)=E=SUM(P2,FHRB(P2,P1));$
 EQ8(P1).. $HRTOTAL(P1)=E=SUM((M,R),IPSILON(M,R,P1)*FROUTE(P1,M,R)*PHI(M,R));$
 EQ9(P1)..

**** PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE BIOTURBOSINA**

EQ10(P1,M).. $FMBTTOTAL(P1,M)=E=SUM(I,FMBT(I,P1,M));$
 EQ11(P1,M).. $FMBTTOTAL(P1,M)=E=SUM(R,FROUTE(P1,M,R));$
 EQ12(P1).. $BP(P1)=E=SUM((M,R),FROUTE(P1,M,R)*PHI(M,R));$
 EQ13(P1).. $BP(P1)=E=SUM(A,BTN(P1,A))+FBI(P1);$

**** PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SUBPRODUCTOS PRODUCIDOS EN LAS BIOREFINERÍAS**

EQ14(P1,J).. $S(P1,J)=E=SUM((M,R),FROUTE(P1,M,R)*ALFA(M,R,J));$
 EQ15(P1,J).. $S(P1,J)=E=SUM(A,Ss(P1,J,A))+FSNI(J,P1);$

**** BALANCE EN LOS MERCADOS DE BIOTURBOSINA**

EQ16(A).. $BTNA(A)=E=SUM(P1,BTN(P1,A))+FBIN(A);$
 EQ17.. $BTI=E=SUM(P1,FBI(P1));$

**** BALANCE EN LOS MERCADOS DE SUBPRODUCTOS**

EQ18(J,A).. $TS(J,A)=E=SUM(P1,Ss(P1,J,A))+FSIN(J,A);$
 EQ19(J).. $SI(J)=E=SUM(P1,FSNI(J,P1));$

**** RESTRICCIONES DE DISPONIBILIDAD**

EQ20(I,M).. $AC(I,M)=L=AD(I,M);$
 EQ21(A).. $BTNA(A)=L=DB(A);$
 EQ22(P1).. $BTI=L=DI(P1);$
 EQ23(J,A).. $TS(J,A)=L=DSMAX(A,J);$

**** RESTRICCIONES DE DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO**

EQ24A(P1).. $BP(P1)=G=BMIN(P1)*BVBYP1);$
 EQ24B(P1).. $BP(P1)=L=BMAX(P1)*BVBYP1);$
 EQ25A(P1,M,R).. $FROUTE(P1,M,R)=G=FROUTEMIN(P1,M,R)*BVBZ(P1,M,R);$

EQ25B(P1,M,R).. $FROUTE(P1,M,R)=L=FROUTEMAX(P1,M,R)*BVBZ(P1,M,R);$
EQ26A(P2).. $PHR(P2)=G=PHRMIN(P2)*BVHRW(P2);$
EQ26B(P2).. $PHR(P2)=L=PHRMAX(P2)*BVHRW(P2);$
EQ27A(P2,M,RHR) $FMROUTE(P2,M,RHR)=G=FMROUTEMIN(P2,M,RHR)*BVHRX(P2,M,RHR);$
.. $FMROUTE(P2,M,RHR)=L=FMROUTEMAX(P2,M,RHR)*BVHRX(P2,M,RHR);$
..

**** COSTO DE MATERIA PRIMA Y POCESAMIENTO**
EQ28.. $COSTFEEDSTOCK=E=SUM((I,M),PB(I,M)*UCFEEDSTOCK(I,M));$
EQ29.. $COSTPROCESSINGBJF=E=SUM((P1,M,R),FROUTE(P1,M,R)*UCBTPROCESSING(P1,M,R));$
EQ30.. $COSTPROCESSINGHR=E=SUM((P2,M,RHR),FMROUTE(P2,M,RHR)*UCHRPROCESSING(P2,M,RHR));$
EQ31.. $COSTPROCESSINGTOTAL=E=COSTPROCESSINGBJF + COSTPROCESSINGHR;$

**** COSTOS DE TRANSPORTE**
EQ32.. $CTMB=E=SUM((I,P1,M),FMBT(I,P1,M)*UCTMB(I,M,P1));$
EQ33.. $CTMHR=E=SUM((I,P2,M),FMHR(I,P2,M)*UCTMHR(I,M,P2));$
EQ34.. $CTB=E=SUM((P1,A),BTN(P1,A)*UCTB(P1,A));$
EQ35.. $CTS=E=SUM((P1,J,A),Ss(P1,J,A)*UCTS(P1,J,A));$
EQ36.. $CTBI=E=SUM(A,FBIN(A)*UCTBI(A));$
EQ37.. $CTSI=E=SUM((J,A),FSIN(J,A)*UCTSI(J,A));$
EQ38.. $CTBE=E=SUM(P1,FBI(P1)*UCTBE(P1));$
EQ39.. $CTSE=E=SUM((J,P1),FSNI(J,P1)*UCTSE(P1,J));$
EQ40.. $CTHRB=E=SUM((P2,P1),FHRB(P2,P1)*UCTHRB(P2,P1));$
EQ41.. $COSTTRANSPORTTOTAL=E=CTMB+CTMHR+CTB+CTS+CTBI+CTSI+CTBE+CTSE+CTHRB;$

**** COSTOS DE CAPITAL**
EQ42.. $CCB=E=SUM(P1,CBB(P1)*BVBY(P1))+SUM((P1,M,R),CRB(P1,M,R)*BVBZ(P1,M,R))+SUM((P1,M,R),CDB(P1,M,R)*FINSTALLE D(P1,M,R));$
EQ42A(P1,M,R).. $FINSTALLED(P1,M,R)=G=FROUTE(P1,M,R);$
EQ43.. $CCHR=E=SUM(P2,CBHR(P2)*BVHRW(P2))+SUM((P2,M,RHR),CRHR(P2,M,RHR)*BVHRX(P2,M,RHR))+SUM((P2,M,RHR),CDHR(P2,M,RHR)*FMINSTALLED(P2,M,RHR));$
EQ43A(P2,M,RHR) $FMINSTALLED(P2,M,RHR)=G=FMROUTE(P2,M,RHR);$
.. $CAPCOST=E=CCB+CCHR;$
EQ44..

**** COSTO DE IMPORTACIÓN BIOTURBOSINA Y SUBPRODUCTOS**

EQ45.. $IMPORTCOST=E=SUM((J,A),FSIN(J,A)*UCBYPRODUCT(J,A))+SUM(A,FBIN(A)*UCBIOJETFUEL(A));$

**** VENTAS**

EQ46.. $DOMESTICSALES=E=SUM((P1,A),BTN(P1,A)*UCBIOJETFUEL(A))+SUM((P1,J,A),SS(P1,J,A)*UCBYPRODUCT(J,A));$

EQ47.. $INTERNATIONALSALLES=E=SUM(P1,FBI(P1))*UCBI+SUM((J,P1),FSNI(J,P1)*UCSI(J));$

EQ48.. $TOTALSALES=E=DOMESTICSALES + INTERNATIONALSALES;$

**** FUNCIÓN OBJETIVO MAX DE LA GANANCIA**

EQ49.. $PROFIT=E=TOTALSALES-COSTFEEDSTOCK-COSTPROCESSINGTOTAL-COSTTRANSPORTTOTAL*1-CAPCOST*1-IMPORTCOST*1;$

**** EMISIONES DE CO2**

EQ50.. $CMPCO_2=E=SUM((I,M),AC(I,M)*CMP(I,M)*BETHA(I,M)*1);$

EQ51.. $TMPCO_2=E=SUM((I,P1,M),FMBT(I,P1,M)*TMPB(I,M,P1))+SUM((I,P2,M),FMHR(I,P2,M)*TMPHR(I,M,P2));$

EQ52.. $THRCO_2=E=SUM((P2,P1),FHRB(P2,P1)*THRB(P2,P1));$

EQ53.. $TBTCO_2=E=SUM((P1,A),BTN(P1,A)*TBT(P1,A))+SUM(A,FBIN(A)*TTIN(A))+SUM(P1,FBI(P1)*TBNI(P1));$

EQ54.. $TSPCO_2=E=SUM((P1,J,A),SS(P1,J,A)*TSP(P1,J,A))+SUM((J,A),FSIN(J,A)*TSIN(J,A))+SUM((J,P1),FSNI(J,P1)*TSNI(J,P1));$

EQ55.. $PMPCO_2=E=SUM((P1,M,R),FROUTE(P1,M,R)*PMP(P1,M,R))+SUM((P2,M,RHR),FMROUTE(P2,M,RHR)*PMPHR(P2,M,RHR));$

EQ56.. $BTCO_2=E=SUM(A, BTNA(A) * BTPC(A)) + BTI * TBMI;$

EQ57.. $SPCO_2=E=SUM((J,A),TS(J,A)*SP(J,A))+SUM(J,SI(J)*SSP(J));$

**** FUNCIÓN OBJETIVO MIN EMISIONES**

EQ58.. $TOTALCO_2=E=TMPCO_2+TBTCO_2+THRCO_2+TSPCO_2+PMPCO_2*0.1+BTCO_2+SPCO_2-CMPCO_2;$

MODEL Producción /ALL/;

SOLVE Producción USING MIP MAXIMIZING PROFIT;

*SOLVE Producción USING MIP MINIMAZING TOTALCO2;