



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

Tesis:

**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE LA CADENA DE
SUMINISTRO PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOTURBOSINA EN MÉXICO**

**Presenta:
SAÚL DOMÍNGUEZ GARCÍA**

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Química como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: Dr. José María Ponce Ortega

Co-Asesor: Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Morelia, Mich.

Febrero del 2017

Agradecimientos

Agradezco al cielo por darme la vida, le inteligencia, sabiduría y fortaleza necesaria para poder avanzar un paso más en el camino al éxito.

A mi padre José Transito y mi madre Eloísa, por darme la vida y amor, porque han sido la base de toda mi carrera y a ellos debo todo lo que soy. A mis hermanos Eva María, Olga Lidia, Jacobo Emanuel, Marycarmen y Mauricio quienes me han apoyado incondicionalmente en todo momento.

A Martín, Luis Abel, Diana Laura, José David, German y Diana Cristina por ser mis grades amigos y compañeros de escuela y de emociones.

Al Dr. José María por que fue no solo mi asesor sino un ejemplo a seguir quien merece todo mi respeto y admiración.

Finalmente a la honorable Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y sus excelentes profesores que me regalaron el conocimiento que hoy poseo y me apoyaron para la culminación de esta maestría.

Índice General

índice De Tablas	V
Índice De Figuras	VI
Resumen	VIII
Abstract	IX
<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	<u>1</u>
<u>2. MARCO TEÓRICO</u>	<u>4</u>
2.1. RESERVAS ENERGÉTICAS FÓSILES	4
2.2. PROCESAMIENTO DE PETRÓLEO PARA LA PRODUCCIÓN DE TURBOSINA	5
2.3. PRODUCCIÓN DE TURBOSINA EN MÉXICO	7
2.4. USO DE BIOTURBOSINA COMO SUSTITUTO DE TURBOSINA	7
2.5. CULTIVOS ENERGÉTICOS EN MÉXICO	8
2.5.1. JATROFA (PIÑÓN)	8
2.5.2. HIGUERILLA	9
2.5.3. CAMELINA	10
2.6. RUTAS DE PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA	11
2.6.1. FISCHER-TROPSCH	11
2.6.2. HIDROTRATAMIENTO	13
2.6.3. CENTIA®	14
2.6.4. GREASOLINE®	15
2.6.5. BIO-SYNFINING®	17
2.7. POLÍTICAS AMBIENTALES EN MÉXICO Y EL MUNDO	18
<u>3. JUSTIFICACIÓN</u>	<u>20</u>
<u>4. HIPÓTESIS</u>	<u>22</u>
<u>5. OBJETIVOS</u>	<u>23</u>
5.1. OBJETIVO GENERAL	23
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
<u>6. METODOLOGÍA</u>	<u>24</u>

6.1. SUPERESTRUCTURA	26
6.2. MODELO MATEMÁTICO	27
6.3. CASOS DE ESTUDIO	38
6.3.1. MÁXIMA UTILIDAD CONSIDERANDO ECONOMÍAS DE ESCALA	38
6.3.2. MÁXIMA UTILIDAD CONSIDERANDO ECONOMÍAS DE ESCALA Y LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA LIMITADA POR LA DEMANDA DEL MERCADO NACIONAL	38
6.3.3. MÁXIMA UTILIDAD DESPRECIANDO ECONOMÍAS DE ESCALA	39
6.3.4. MÁXIMA UTILIDAD DESPRECIANDO ECONOMÍAS DE ESCALA Y CONSIDERANDO LA PRODUCCIÓN LIMITADA POR DEMANDA DEL MERCADO NACIONAL	39
6.3.5. CURVA PARETO	40
<u>7. RESULTADOS</u>	<u>41</u>
7.1. MÁXIMA UTILIDAD CONSIDERANDO ECONOMÍAS DE ESCALA	43
7.2. MÁXIMA UTILIDAD CONSIDERANDO ECONOMÍAS DE ESCALA Y LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA LIMITADA POR LA DEMANDA DEL MERCADO NACIONAL	46
7.3. MÁXIMA UTILIDAD DESPRECIANDO ECONOMÍAS DE ESCALA	50
7.4. MÁXIMA UTILIDAD DESPRECIANDO ECONOMÍAS DE ESCALA Y CONSIDERANDO LA PRODUCCIÓN LIMITADA POR DEMANDA DEL MERCADO NACIONAL	51
7.5. CURVA PARETO	52
7.6. SOLUCIÓN COMPENSADA	54
<u>8. CONCLUSIONES</u>	<u>58</u>
<u>9. NOMENCLATURA</u>	<u>59</u>
<u>10. BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>63</u>
<u>11. APÉNDICES</u>	<u>67</u>
11.1. TABLAS DE PARÁMETROS	67
11.2. CÓDIGO DEL MODELO MATEMÁTICO PROGRAMADO EN GAMS	71

Índice de Tablas

TABLA 1. Propiedades de turbosina y bioturbosina	6
TABLA 2. Precios y costos unitarios usados en el modelo matemático	41
TABLA 3. Parámetros unitarios de emisiones de CO ₂	42
TABLA 4. Resultados económicos para los casos estudiados	44
TABLA 5. Distribución de bioturbosina para el Caso 1. Único punto de producción y distribución (TAMAULIPAS)	45
TABLA 6. Producción y distribución de bioturbosina desde Jalisco	48
TABLA 7. Producción y distribución de bioturbosina desde Tamaulipas	49
TABLA 8. Resultados ambientales para caso 5	55
TABLA 9. Producción de materias primas, bioturbosina y subproductos para el Caso 5	56
TABLA 10. $\phi_{m,r}$ Conversión de la materia prima m a bioturbosina por medio cada ruta de procesamiento	67
TABLA 11. Parámetros relacionados con la conversión de materia prima ($\alpha_{m,r,j}$ Conversión de la materia prima m al subproducto j)	68
TABLA 12. $\beta_{i,m}$ Factor de rendimiento del cultivo m en el sitio i	69
TABLA 13. Demanda de turbosina por aeropuerto	70

Índice de Figuras

FIGURA 1. <i>Semillas de jatrofa curcas</i>	9
FIGURA 2. <i>Semillas de higuera o ricinus communis</i>	10
FIGURA 3. <i>Semillas de camelina</i>	11
FIGURA 4. <i>Diagrama de bloques del proceso fischer-tropsch para la producción de bioturbosina</i>	13
FIGURA 5. <i>Diagrama de bloques del proceso hidrotratamiento para la producción de bioturbosina</i>	14
FIGURA 6. <i>Diagrama de bloques del proceso centia® para la producción de bioturbosina</i>	15
FIGURA 7. <i>Diagrama de bloques del proceso greasoline® para la producción de bioturbosina</i>	16
FIGURA 8. <i>Diagrama de bloques del proceso bio-synfining® para la producción de bioturbosina</i>	18
FIGURA 9. <i>Representación esquemática de la cadena de suministros para la producción de bioturbosina</i>	24
FIGURA 10. <i>Superestructura de la cadena de suministros para la producción de bioturbosina</i>	26
FIGURA 11. <i>Representación esquemática para el caso de estudio 1</i>	44
FIGURA 12. <i>Representación esquemática para el caso de estudio 2</i>	47
FIGURA 13. <i>Representación esquemática para el caso de estudio 3</i>	51
FIGURA 14. <i>Representación esquemática para el caso de estudio 4</i>	52
FIGURA 15. <i>Curva pareto, emisiones de CO₂ vs ganancia</i>	53
FIGURA 16. <i>Representación esquemática para el caso de estudio 5</i>	57

Resumen

Hay grandes retos para remplazar a los combustibles fósiles por biocombustibles, incluyendo el desarrollo de eficientes tecnologías y apropiadas estrategias de planificación. Para la producción de biocombustibles a nivel industrial es necesario optimizar la cadena de suministros global asociada. Entre los biocombustibles, el mercado para la bioturbosina ha incrementado drásticamente, debido principalmente al crecimiento previsto del sector aeronáutico. Sin embargo, la cadena de suministros para la bioturbosina posee características específicas, dada la naturaleza de la industria de la aviación la cual es diferente a la industria asociada con la producción de bioetanol y biodiésel. Por lo tanto, este trabajo presenta un enfoque de optimización general para la cadena de suministros de la bioturbosina. El caso de estudio de México es presentado, tomando en cuenta la proyección del gobierno mexicano para implementar el uso de bioturbosina en la red de aeropuertos mexicanos. El enfoque propuesto es resuelto, identificándose soluciones muy atractivas que pudieran ser aplicadas. Entre estas soluciones, el grafico de Pareto fue encontrado, y se observó que la demanda de bioturbosina en el mercado mexicano puede satisfacerse con un beneficio económico bruto de M\$ 1681 por año, así como con una reducción del 93 % en las emisiones de dióxido de carbono comparadas a las emitidas por uso de una cantidad equivalente de turbosina fósil.

Palabras clave: Biomasa, Bioturbosina, Cadena de suministros, Optimización, Sustentabilidad.

Abstract

There are great challenges to replace fossil fuels by biofuels, including the development of efficient technologies and appropriate strategic planning. For the manufacture of biofuels at the industrial scale, there is a need to optimize the overall associated supply chain. Among biofuels, the global market for the aviation biofuel has increased drastically, mainly due to the forecasted growth of the aviation sector. Nevertheless, the supply chain for the aviation biofuel has specific characteristics, which are different from the case of bioethanol and biodiesel. Therefore, this research work presents a general approach for optimizing the supply chain of aviation biofuels. A case study from Mexico is presented accounting for the projection for implementing the use of aviation biofuel in the national airport network. The application of the proposed approach identifies very interesting solutions; between these solutions, a set of Pareto solutions was found. It was observed that the demand for aviation biofuel in the Mexican market can be satisfied with a gross economic benefit of M\$ 1681 per year and savings of 93 % of carbon dioxide emissions compared to those emitted by using an equivalent amount of fossil jet fuel.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las principales fuentes de energía son de origen fósil, las cuales incluyen al gas natural, petróleo y carbón; pero su disponibilidad es incierta y la demanda de éstos energéticos aumenta con el tiempo. Adicionalmente, el uso de estas fuentes de energía contribuye con el aumento del calentamiento global, debido a la gran cantidad de CO₂ y otros gases contaminantes (SO_x y NO_x) que se liberan en la atmósfera (Sánchez-Ramírez et al. 2016). El uso de biocombustibles es una alternativa prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Hoy en día los dos combustibles más conocidos son el biodiésel y el bioetanol, para los cuales existen diversas rutas o tecnologías para su producción; ambos son usados como combustibles para transportes terrestres. Para el transporte aéreo se ha propuesto a la bioturbosina, combustible renovable de aviación, como sustituto de la turbosina convencional. Para la producción de la bioturbosina el desarrollo tecnológico es apenas incipiente, y para poder ser considerada como una opción factible hay muchos retos por vencer. Los principales retos son el desarrollo de la tecnología adecuada que disminuya los costos de producción, y por otro lado la planeación adecuada para su producción y distribución.

Recientemente los gobiernos de México y el mundo han puesto su interés en proteger el medio ambiente, para evitar que el clima del planeta sufra grandes cambios que perjudiquen a nuestra sociedad. Específicamente, para mitigar las emisiones provenientes del uso de turbosina, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA por sus siglas en inglés) recomienda incrementar el uso de bioturbosina desde 1 % hasta 50 % empezando en el año 2015 (Sepúlveda-González 2012). El uso de bioturbosina en mezclas con turbosina convencional ya ha sido estudiado, asimismo se han determinado sus propiedades

fisicoquímicas, y diversas fuentes de biorecursos para su producción también ya han sido identificadas (Hong et al. 2013).

Particularmente la cadena de suministros asociada a la bioturbosina es muy importante porque este biocombustible tiene un mercado muy específico: los aeropuertos. De esta forma, determinar el proceso de producción y distribución de este combustible, así como el uso de las fuentes de biomasa disponibles para el caso de estudio de México son aspectos muy importantes, debido a que el costo de transporte es un factor determinante. Por lo tanto, la ubicación de las biorefinerías así como los sitios de biomasa y los mercados deben considerarse de manera simultánea. En este contexto, recientemente han sido reportadas varias propuestas de optimización para cadenas de suministros para biorefinerías. De esta manera, Santibáñez-Aguilar et al. (2011) reportaron una formulación de optimización para las cadenas de suministros asociadas a biorefinerías; posteriormente Santibáñez-Aguilar et al. (2013) incorporaron una biorefinería que se basa en el uso de Lirio acuático como fuente de biomasa. Por otra parte, Murillo-Alvarado et al. (2015) consideraron la optimización de la cadena de suministros de una biorefinería teniendo como base el uso de la biomasa residual de la producción de tequila en México. Además, Moraes et al. (2014) implementaron un estudio para determinar los aspectos socio-económicos para la producción de bioturbosina en Brasil, mientras Köhler et al. (2014) implementaron un análisis similar en el mundo entero. Por otra parte, un modelo Mixto Entero Lineal (MILP) fue formulado para optimizar la cadena de suministros asociada a la producción de bioetanol como combustible por Dyken et al. (2010). Santibáñez-Aguilar et al. (2014) propusieron una formulación MILP multi-objetivo para optimizar cadenas de suministros incorporando simultáneamente aspectos económicos y ambientales. Recientemente, Tan et al (2016) reportaron una optimización para

el sistema de cultivo de micro algas. Para el caso específico de la bioturbosina, una exploración sobre las diferentes rutas de proceso mediante diferentes materias primas fue presentado por Chiaramonti et al (2014).

Debe ser notado que ninguno de los trabajos antes mencionados ha abordado la planeación óptima de la cadena de suministros para la producción de bioturbosina. Por lo tanto, en este trabajo se presenta una formulación matemática para la planeación óptima de la cadena de suministros para producir bioturbosina a partir de diferentes materias primas (Jatrofa, Higuierilla y Camelina) a través de diferentes rutas de proceso (Hidrotratamiento, Fischer-Tropsch, Centia, Greasoline y Bio-Synfining), incluyendo la localización adecuada de las cultivos de materias primas, las biorefinerías y la distribución a los mercados, considerando simultáneamente aspectos económicos y ambientales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. RESERVAS ENERGÉTICAS FÓSILES

Las reservas energéticas totales, estimadas al primero de enero del 2014, ascienden a 42 mil 158.4 millones de barriles de petróleo crudo equivalente. El petróleo crudo equivalente es una forma utilizada a nivel internacional para representar el inventario total de hidrocarburos. Su valor es el resultado de adicionar los volúmenes de aceite crudo, de condensado, de líquidos en planta, y de gas seco equivalente a líquido. Este último corresponde, en términos de poder calorífico, a un cierto volumen de aceite crudo.

Las reservas totales se dividen en tres grupos: probadas, probables y posibles. Las reservas probadas de hidrocarburos son cantidades estimadas de aceite crudo, gas natural, y líquidos de gas natural; las cuales, mediante datos de geociencia y de ingeniería, demuestran con certidumbre razonable que serán recuperadas en años futuros. Las reservas probadas de hidrocarburos de México se evaluaron de acuerdo con los criterios y definiciones de la Securities and Exchange Commission (SEC) de Estados Unidos, reportando reservas remanentes, al 1 de enero de 2014, por 13 mil 438.5 millones de barriles de petróleo crudo equivalente. Las reservas probables son aquellas reservas no probadas en donde el análisis de la información geológica y de ingeniería del yacimiento sugiere que son más factibles de recuperar que lo contrario: las reservas probables de hidrocarburos en Pemex, al primero de enero del 2014, ascienden a 11 mil 377.2 millones de barriles de petróleo crudo equivalente. Las reservas posibles son aquellos volúmenes de hidrocarburos cuya información geológica y de ingeniería sugiere que es menos segura su recuperación comercial que las reservas probables; las reservas posibles de hidrocarburos en Pemex, al primero de enero del 2014, ascienden a 17 mil 342.7 millones de barriles de petróleo crudo equivalente.

2.2. PROCESAMIENTO DE PETRÓLEO PARA LA PRODUCCIÓN DE TURBOSINA

Los combustibles líquidos derivados del petróleo se componen básicamente de hidrocarburos. También pueden contener compuestos oxigenados y algunos aditivos que les imparten determinadas características, así como pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno y metales que no pueden eliminarse completamente en los procesos de refinación y se consideran contaminantes.

Los combustibles gasolina, diésel, turbosina, combustóleo, etc. se obtienen a partir de la destilación del petróleo crudo, y posteriormente algunos procesos adicionales para mejorar sus propiedades, tales como; isomerización, hidrosulfuración, hidrosulfuración, etc. Con la finalidad de cumplir los parámetros energéticos y ambientales necesarios para su uso, la gasolina y el diésel se utilizan como carburantes para motores de combustión interna, pero cada uno de ellos con propiedades físicas y composición distinta, debido al tipo y concentración de los hidrocarburos en cada combustible. La turbosina se destina en su totalidad al transporte aéreo, en tanto que el combustóleo se utiliza para calentar hornos, calderas y otros equipos térmicos.

La turbosina es un líquido inflamable constituido por hidrocarburos parafinados y aromáticos, que se obtiene como destilado intermedio del petróleo. Se produce en todas las refinerías. La función primordial de la turbosina es mover las turbinas que dan propulsión a las aeronaves, por lo que el contenido energético y la calidad de la combustión son propiedades clave para su funcionamiento.

El tamaño de las moléculas de hidrocarburos presentes en la turbosina es restringido principalmente por la especificación del destilado y el punto de congelación: las familias

comunes que se encuentran presentes en estos combustibles son parafinas, naftenos y aromáticos de 8 a 16 átomos de carbono. La fracción de turbosina tiene un límite de temperatura de ebullición de 200 a 300° C máximo, una vez destilado es sometido a un proceso de hidrodesulfuración para obtener turbosina con un contenido de aromáticos no mayor a 22% vol. y un peso específico entre 0.772 y 0.837, entre otras características.

En la turbosina, por tratarse de un combustible intermedio entre la gasolina y el diésel, suelen encontrarse en su composición algunos hidrocarburos presentes en dichos combustibles, pero son otros compuestos que por su mayor concentración le conceden sus propiedades distintivas en volatilidad, estabilidad, lubricidad, fluidez, corrosividad, entre otras. Sus principales propiedades son: Poder calorífico de 42 MJ/kg, con un porcentaje máximo en volumen de aromáticos no mayor a 25 %, temperatura máxima de congelación de – 47 °C, temperatura mínima de inflamación de 38° C, color brillante y claro, olor característico a gasolina y es insoluble en agua a 20° C. La **Tabla 1** contiene datos de las propiedades físico químicas de los biocombustibles para aviación Bio-P1 y Bio-JP2 y para el combustible para aviación de origen fósil Jet A-1 (Hong et al. 2013).

Tabla 1. Propiedades de turbosina y bioturbosina.

Propiedad	ASTM D1655	Bio-P1	Bio-JP2	Jet A-1
Punto de congelación (°C)	Max.-47	9.5	-18.5	-55
Poder calorífico (MJ/kg)	Min. 42.8	42.48	44.97	44.45
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	775–840	759	758	781
Punto de ignición (°C)	Min. 38	47	45	48
Viscosidad a 25 °C (mm ² /s)	–	4.199	2.074	1.599
Viscosidad a–20 °C (mm ² /s)	Max. 8.0	6.485	6.94	6.789
Azufre total (peso %)	Max. 0.3	11 ppm	10 ppm	470 ppm
Temperatura de destilación				
Inicial Te (°C)	Reportada	141	126	146
Final Te (°C)	Max. 300	308	306	247

2.3. PRODUCCIÓN DE TURBOSINA EN MÉXICO

La producción de turbosina en México hasta el año 2011 había sido autosuficiente para cubrir la demanda del sector aéreo nacional, pero a partir del año 2011 se comenzó a registrar las primeras importaciones de este combustible. La Secretaria de Energía (SENER) espera, de acuerdo a sus proyecciones, un aumento promedio de 4 % anual en el consumo de turbosina; mientras que en el Sistema Nacional de Refinación (SNR) se han hecho modificaciones para aumentar la capacidad de producción del combustible para aeronave. A pesar de esto, PEMEX no tendrá la capacidad para satisfacer la demanda, puesto que se ha estimado que de 61 miles de barriles diarios demandados en el año 2014 en México se aumentará a 101 miles de barriles diarios en el año 2027.

2.4. USO DE BIOTURBOSINA COMO SUSTITUTO DE TURBOSINA

La bioturbosina es un combustible homologado a la turbosina obtenida del petróleo, con propiedades físico-químicas muy parecidas a la turbosina, la principal característica que la diferencia de la turbosina convencional es su obtención a partir de biomasa. La composición de la bioturbosina presenta cierta disparidad en el contenido de moléculas aromáticas en comparación con la turbosina de origen fósil. Para compensar las diferencias en contenido de compuestos aromáticos la bioturbosina debe mezclarse con turbosina convencional en cantidades 50% de cada una de ellas, para cumplir con los requerimientos de la norma ASTM D7566 (Especificación estándar para combustible de turbina de aviación que contiene hidrocarburos sintetizados).

2.5. CULTIVOS ENERGÉTICOS EN MÉXICO

La biomasa necesaria para la producción de bioturbosina puede ser obtenida de fuentes de segunda generación; estas fuentes son: desechos de comida, residuos orgánicos de otras industrias, basura, aceite usado como lubricante, cultivos de frutos o semillas que no son usados para alimentar a la población. Los desechos de comida y los residuos de otras industrias son una opción atractiva, pero están limitados a las demandas alimenticias y de los productos industriales. Los aceites usados como lubricantes son una opción menos atractiva, debido a que la mayoría de éstos se producen a partir de petróleo; por lo tanto, no son una alternativa renovable sino un segundo uso. Los cultivos de semillas no comestibles podrían ser la mejor opción para obtener biomasa. México presenta una gran biodiversidad de cultivos y por consecuencia un área de oportunidad muy grande. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de México (INIFAP) ha reportado el potencial productivo de varios cultivos bioenergéticos, entre ellos la Jatrofa, higuera y camelina, las **Figuras 1, 2 y 3** son fotografías de las semillas de estos cultivos; los tres son cultivos de segunda generación debido a que no son comestibles.

2.5.1. *Jatrofa (Piñón)*

El género *Jatrofa* está representado por 188 especies, y se distribuye principalmente en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. En México la especie de mayor importancia es *Jatrofa curcas* L.; se considera a nuestro país y Centroamérica como su centro de origen, siendo Chiapas, Veracruz, Michoacán y Puebla los estados de mayor potencial para su producción.

La planta es tolerante a la sequía, crece bien en tierras marginales, exige únicamente un régimen de precipitación moderada de 300 a 1,000 mm anuales, es fácil de propagar y puede ayudar a recuperar tierras erosionadas. La semilla de Jatrofa tiene un contenido en aceite de 26.4 a 56.9% en peso en pruebas de laboratorio, y un rendimiento por hectárea de hasta 4 toneladas dependiendo la zona donde se cultive.



Figura 1. Semillas de Jatrofa curcas

2.5.2. Higuierilla

La higuierilla o Ricinus Communis, que es su nombre científico, es una planta típica de regiones tropicales y subtropicales. Su origen es muy discutido puesto que algunos la consideran originaria de Asia, otros como nativa de América y otros creen que su origen es africano. La semilla de Higuierilla tiene un contenido en aceite de 45 a 50 % en peso en pruebas de laboratorio, y un rendimiento por hectárea de hasta 4 toneladas dependiendo de la zona donde se cultive.



Figura 2. Semillas de higuera o Ricinus Communis

2.5.3. Camelina

La camelina es un cultivo energético no comestible, las semillas de esta planta contienen de 30 a 40 % en masa de aceite el residuo puede ser usado para alimentar ganado o como biomasa para producir calor. El precio de aceite de semilla de camelina varía de \$ 0.1 a \$ 0.2 USD por litro dependiendo de la calidad. La semilla de Camelina tiene un contenido de aceite de 33 a 42 % en peso en pruebas de laboratorio, y un rendimiento por hectárea de 1 tonelada dependiendo de la zona donde se cultive.



Figura 3. Semillas de Camelina.

2.6. RUTAS DE PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA

Para la producción de Bioturbosina existen diferentes tecnologías con las cuales se puede transformar la biomasa en hidrocarburos combustibles; en lo que concierne a este trabajo se considera la transformación de biomasa a Bioturbosina. Cada una de las cinco tecnologías existentes presenta diferentes factores de conversión, costos asociados de capital y de proceso, además de diferentes factores de emisión de CO₂ por el proceso de la materia prima. A continuación se presenta una breve reseña de cada una de estas tecnologías.

2.6.1. Fischer-Tropsch

El proceso Fischer-Tropsch, conocido también como licuefacción indirecta del carbón, fue desarrollado por los químicos alemanes Franz Fischer y Hans Tropsch entre 1920 y 1925 en el Instituto de Investigaciones del Carbón en Alemania. Este proceso tradicional implica la gasificación previa del carbón por oxidación parcial, usando oxígeno como oxidante y vapor de agua como moderador a altas temperaturas (aproximadamente 1100 K); así se obtiene una mezcla de H₂ y CO conocida como gas de síntesis (Syngas), de fácil separación de las

partículas sólidas y gases ácidos. En este proceso puede usarse biomasa como fuente carbón, ya sea pura o en combinación con carbón mineral; sin embargo, la composición de Syngas producido varía de acuerdo con la alimentación al proceso. En una segunda etapa, el gas de síntesis se transforma mediante un proceso catalítico en parafinas y olefinas lineales; esto se efectúa con catalizadores de Co y Fe, a temperaturas de 450-650 K y presiones de 15 a 40 bares. El peso molecular promedio de los productos es de C10-C20, que constituye un combustible diésel muy puro debido a su carácter lineal. El producto de esta etapa no está limitado a diésel, con las adecuadas modificaciones en las condiciones de los procesos se puede obtener gasolina o turbosina. Las principales ventajas de este proceso son que puede usarse una amplia variedad de biomasa para producir el gas de síntesis, y los combustibles obtenidos tienen un bajo contenido de azufre y compuestos aromáticos. Las principales desventajas son que es un proceso muy costoso y que la eficiencia del proceso es baja, de 25 a 50 %.

La **Figura 4** muestra las etapas del proceso Fischer-Tropsch para transformar biomasa en bioturbosina. Este proceso está constituido por tres etapas; Gasificación de biomasa para obtener Syngas, una reacción catalítica para transformar el Syngas a Hidrocarburos y finalmente una etapa de separación.

Fischer-Tropsch

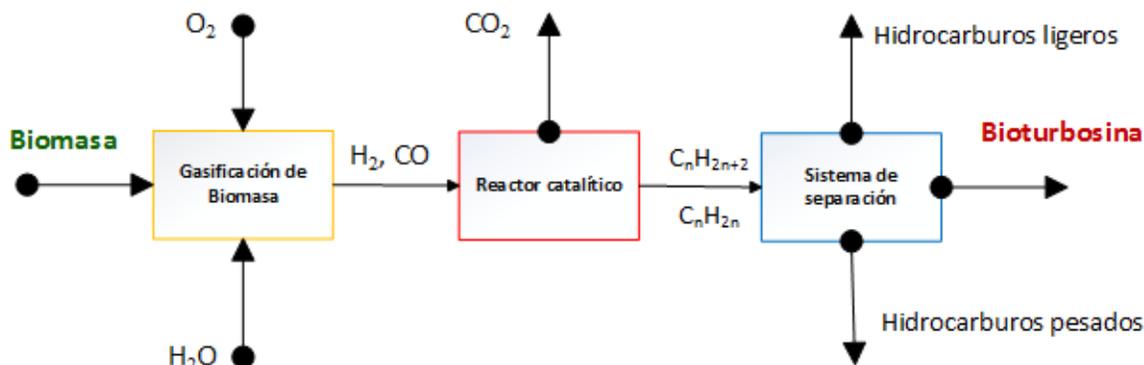


Figura 4. Diagrama de bloques del proceso Fischer-Tropsch para la producción de bioturbosina.

2.6.2. Hidrotratamiento

El Hidrotratamiento consiste en hidrogenar aceites o grasas de origen vegetal o animal para obtener hidrocarburos correspondientes a los ácidos grasos presentes en el aceite del cual proviene. Las principales ventajas de este proceso son que el producto generado contiene una reducida cantidad de óxidos de nitrógeno, no contiene azufre ni compuestos aromáticos, además de poseer un elevado número de cetanos (Claudia Gutiérrez-Antonio, 2016). La diferencia de cetanos comparado con la turbosina de origen fósil afecta la ignición en el motor, pero este problema es resuelto mezclando bioturbosina con turbosina convencional.

El proceso de Hidrotratamiento fue desarrollado por UOP Honeywell (Universal Oil Products), y consisten en la transformación de triglicéridos a través de un proceso de Hidrodesoxigenación, Hidroisomerización e Hidrofragmentación (Hydrocracking) para generar hidrocarburos renovables; este proceso es muy similar al ya existente en las refinerías de petróleo. Los requerimientos de materias primas para este proceso son: triglicéridos, de

origen vegetal o animal, e hidrógeno; de acuerdo con UOP es posible obtener rendimientos de hasta 36 % de bioturbosina con respecto a la alimentación.

La **Figura 5** muestra las etapas del proceso de Hidrotratamiento para transformar el aceite vegetal en bioturbosina. Este proceso está constituido por tres etapas: Extracción de aceite a partir de semillas de los cultivos energéticos, Hidrotratamiento de los ácidos grasos provenientes del aceite, y finalmente un sistema de separación.

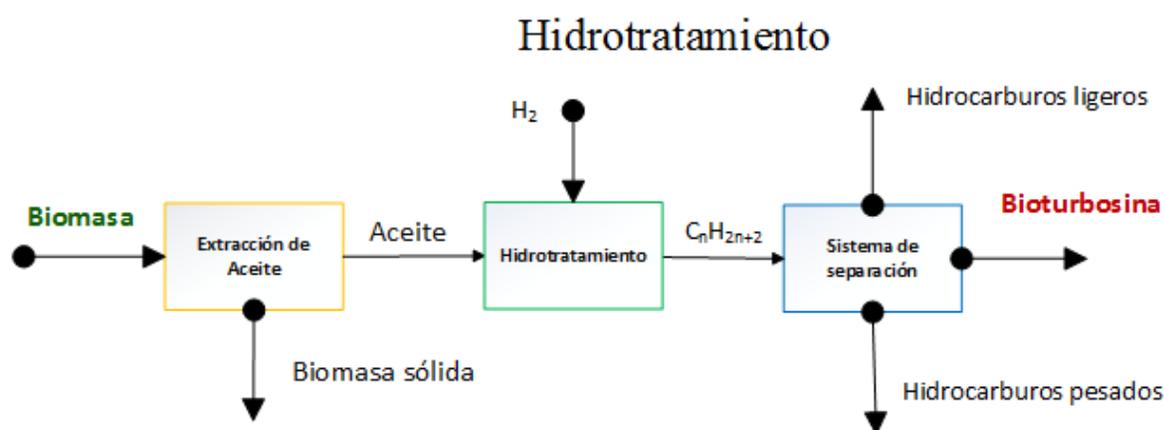


Figura 5. Diagrama de bloques del proceso Hidrotratamiento para la producción de bioturbosina.

2.6.3. Centia®

La tecnología Centia fue desarrollado por DEC (Diversified Energy Corporation) y NCSU (North California State University) en Estados unidos de América. El nombre de esta tecnología “Centia®” proviene de las palabras “Poder verde” en latín. Esta tecnología integra una secuencia de tres pasos para producir biogasolina, bioturbosina y diésel renovable, a partir de triglicéridos o aceites de origen vegetal o animal. Una de las principales ventajas de esta tecnología es que replica la estructura química de sus contrapartes derivados del petróleo; por lo tanto no es necesario hacer modificaciones a los motores para que puedan usar estos combustibles.

La primera etapa del proceso Centia® está diseñada para procesar cualquier clase de triglicéridos como materia prima del proceso; de esta manera es posible transformar aceites de granos cultivados, grasas animales, aceite de algas, grasas de desechos y muchos otros. Este proceso tiene una conversión energética mayor al 85% y una conversión de masa del 75%.

La **Figura 6** muestra las etapas del proceso Centia® para transformar el aceite vegetal en bioturbosina. Este proceso está constituido por cinco etapas: Extracción de aceite a partir de semillas de los cultivos energéticos, hidrólisis de los triglicéridos presentes en el aceite, reacción de Descarboxilación para eliminar el oxígeno, Reformado alternativo para modificar el tamaño y la forma de las moléculas, y finalmente un sistema de separación.

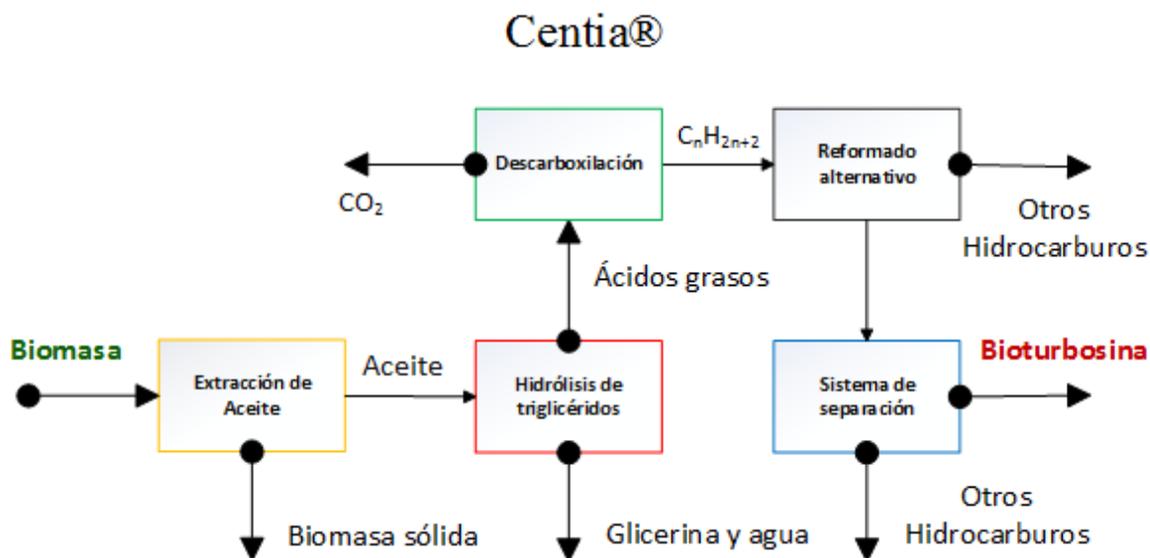


Figura 6. Diagrama de bloques del proceso Centia® para la producción de bioturbosina.

2.6.4. Greasoline®

La tecnología Greasoline® convierte aceites, grasas y materiales de desecho en una mezcla de hidrocarburos con composición semejante a la gasolina, diésel o queroseno. Este proceso

fue desarrollado por el Instituto de Tecnología Ambiental, Seguridad y Energía de Fraunhofer UMSICHT, en Oberhausen, Alemania.

Los principales productos de este proceso son hidrocarburos con cadenas de carbón idénticas al diésel de origen fósil. Muchos de los componentes de diésel pueden ser transformados en queroseno por medio de una isomerización. Otra ventaja importante de la tecnología Greasoline® es que a través de éste es posible producir alquilbencenos, los cuales son importantes para que la turbosina tenga las propiedades que la caracterizan.

La tecnología básica no necesita hidrógeno externo debido a la formación de coque como subproducto en el catalizador automáticamente, cerrando así como el balance de carbón-hidrógeno en el sistema. Un siguiente paso de hidrogenación es opcional sólo si se necesita mejorar algunos parámetros de calidad del combustible.

La **Figura 7** muestra las etapas del proceso Greasoline® para transformar biomasa en bioturbosina. Este proceso está constituido por tres etapas: Gasificación de la biomasa, Reacción catalítica, y finalmente un sistema de separación.

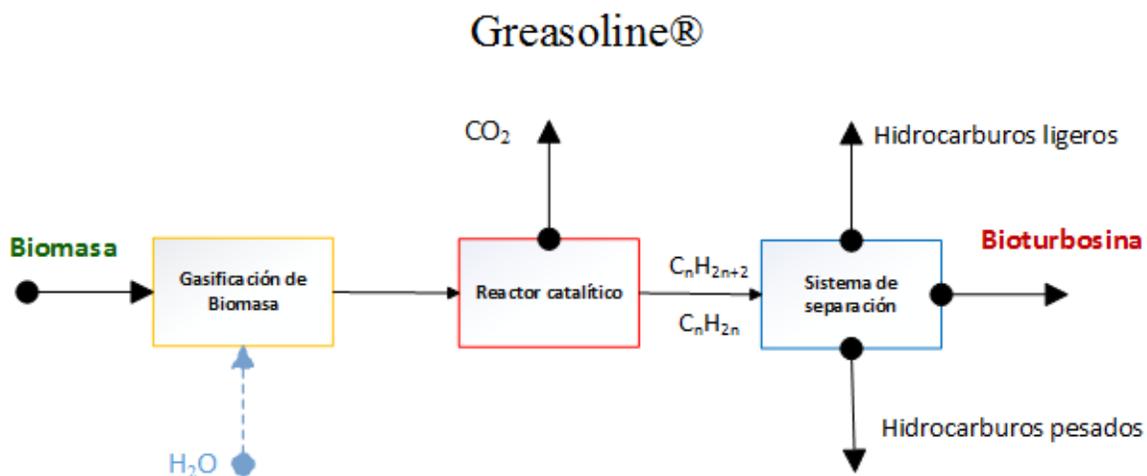


Figura 7. Diagrama de bloques del proceso Greasoline® para la producción de bioturbosina.

2.6.5. *Bio-synfining*®

La tecnología Bio-Synfining® ha sido desarrollado por la empresa Syntroleum; este proceso puede utilizar una amplia variedad de materias primas, para transformarlas en combustibles renovable de alta calidad. El primer paso consiste en un pretratamiento, en el cual se eliminan los contaminantes, de esta manera se obtiene materia prima pura apropiada para llevar a cabo la reacción. Durante este proceso se remueven los contaminantes físicos usando filtros y centrífugas.

En una segunda etapa, la materia prima se lleva a un proceso de Hidrodesoxigenación, en el cual el Oxígeno y los dobles enlaces son eliminados, también las cadenas de ácidos grasos son saturados y el azufre y el nitrógeno son removidos, creando un hidrocarburo puro. Los hidrocarburos obtenidos son isomerizados posteriormente, para obtener moléculas más pequeñas y de diferentes formas. Finalmente los productos son sometidos a un proceso de separación para obtener diferentes combustibles.

La **Figura 8** muestra las etapas del proceso Bio-synfining® para transformar el aceite vegetal en bioturbosina. Este proceso está constituido por cuatro etapas: Extracción de aceite, Proceso de Hidrodesoxigenación, Isomerización y reformado, y finalmente un sistema de separación.

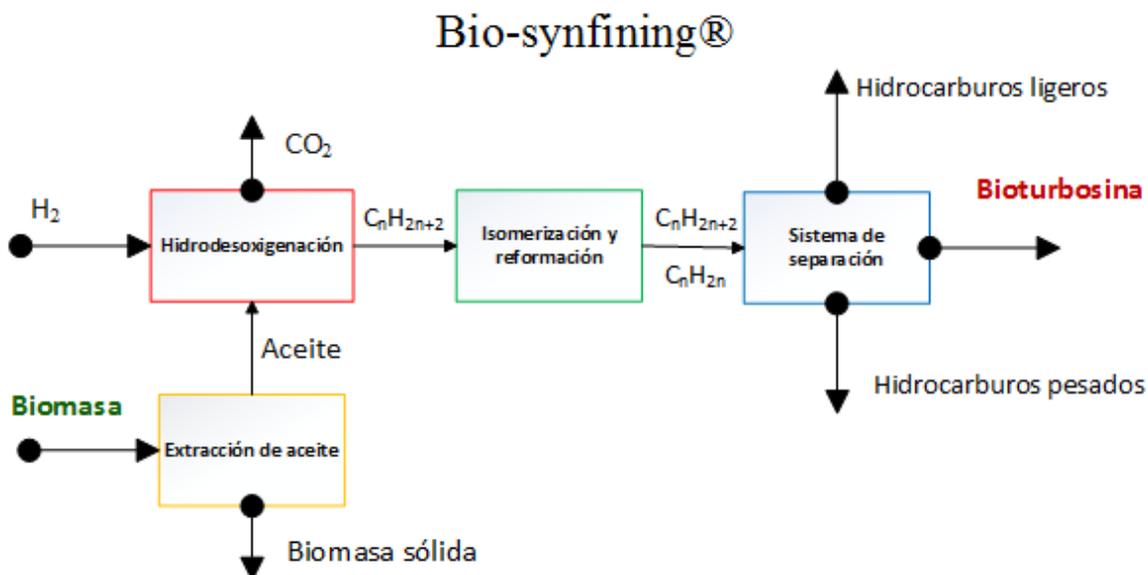


Figura 8. Diagrama de bloques del proceso Bio-synfining® para la producción de bioturbosina.

2.7. POLÍTICAS AMBIENTALES EN MÉXICO Y EL MUNDO

El 21 de septiembre del 2016 México ratificó en la Organización de las Naciones Unidas, ONU, su adhesión al acuerdo de París. Este acuerdo establece que las partes (los países que se han sumado al acuerdo) deben iniciar programas de control de emisiones para mitigar el cambio climático. El objetivo principal de este acuerdo es mantener el aumento de la temperatura, provocado por las grandes cantidades de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, por debajo de 2 °C, tomando como base la temperatura ambiental preindustrial. Las partes participantes deben hacer un informe de su aportación cada 5 años ante la ONU, en cual se demuestre al avance que han logrado para mantener o aumentar los sumideros de bióxido de carbono. Por otra parte, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) ha propuesto un plan para disminuir las emisiones causadas por el transporte aéreo; este plan considera incrementar paulatinamente el uso de bioturbosina desde 1% hasta el 50% empezando en el año 2015. Las políticas ambientales en las que México ha ratificado

su participación y las estrategias para alcanzar las metas establecidas representan un gran reto que superar. México, así como muchos países del mundo, no cuenta con la infraestructura para la producción de bioturbosina, por consecuencia habrá una demanda muy alta de este combustible que satisfacer.

3. JUSTIFICACIÓN

Gracias a los avances tecnológicos en el sector energético, desarrollados en el siglo pasado, es que ahora cualquier persona puede viajar en un automóvil, barco, avión o cualquier otro vehículo, transportar material de un lugar a otro o accionar alguna maquinaria para realizar labores que demandan esfuerzos superiores a las capacidades humanas; lo anterior a expensas del consumo de combustibles, derivados de fuentes energéticas no renovables tales como el petróleo. El petróleo no sólo es la fuente de energía que impulsa vehículos o maquinaria de trabajo, sino que también es un pilar fundamental en la economía de México y el mundo.

Con el aumento acelerado del crecimiento poblacional, la demanda de combustibles ha crecido exponencialmente, por lo que las reservas de petróleo están disminuyendo cada vez más rápido. La disminución en la disponibilidad de hidrocarburos fósiles tiene repercusión directa en los precios de los combustibles; pero el aumento en el precio no es el problema más grave, sino el hecho inevitable de que con el paso de los años las reservas de petróleo se agotarán. Como efecto colateral, el daño al medio ambiente también ha aumentado a consecuencia de las grandes cantidades de dióxido de carbono producido en la quema de combustibles derivados del petróleo.

Para asegurar el futuro de la sociedad es esencial planificar y proponer estratégicamente el abasto del combustible, para evitar daños al medio ambiente y superar el problema del agotamiento de recursos naturales no renovables. Una alternativa para mitigar los problemas antes descritos es el uso de biocombustibles provenientes de recursos renovables ya que con su uso es posible disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, con respecto al uso de combustibles fósiles; dado que cualquier cantidad de dióxido de carbono emitido en la combustión será recuperada en el crecimiento de algún cultivo.

Hoy en día, la tecnología para la producción de biocombustibles ya está disponible, y en algunos lugares del mundo ya está siendo aplicada; sin embargo, no compite con el uso de combustibles fósiles puesto que es menos rentable, y también tiene consecuencias ambientales. Sin embargo, dadas las ventajas del empleo de biocombustibles, es necesario realizar un análisis de sustentabilidad en condiciones óptimas para poder comparar y discernir en su uso respecto de los combustibles fósiles, considerando la maximización del beneficio global y la minimización de las emisiones de CO₂ asociadas.

4. HIPÓTESIS

Mediante la solución del modelo de programación matemática propuesto para optimizar la cadena de suministro para la producción de bioturbosina en México se puede determinar la configuración de la red de producción que justifique y garantice la sustentabilidad de su uso.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Optimizar la producción y distribución de bioturbosina en México considerando la cadena de valor global.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las mejores materias primas, sitios de producción y procesamiento así como las tecnologías más adecuadas y sus tamaños correspondientes.
- Determinar la distribución y almacenamiento óptimo de los productos.
- Analizar la relación técnico-económico-ambiental-social que permita determinar la solución más sostenible.

La metodología para desarrollar este proyecto es la siguiente:

- Se propone una superestructura que represente adecuadamente la cadena de suministros para la producción de bioturbosina.
- Con base en la superestructura de la cadena de suministros para la producción de bioturbosina se establece un modelo, por medio de relaciones matemáticas que represente adecuadamente el problema.
- Investigar, determinar o estimar los parámetros necesarios para relacionar el modelo matemático con la realidad.
- Se realizan simulaciones preliminares para determinar que el modelo matemático fue planteado adecuadamente.
- Se realiza un análisis de sensibilidad, modificando algunas restricciones para la capacidad de producción en el modelo matemático para diferentes casos de estudio.
- Se determina la cadena de suministros mejor compensada que considera el compromiso entre las emisiones de dióxido de carbono y el beneficio económico, mediante la construcción de una curva Pareto.

6.1. SUPERESTRUCTURA

La **Figura 10** presenta gráficamente el conjunto de todas las posibles combinaciones entre sitios de cultivo de biomasa, la localización de las biorefinerías y los mercados, también las rutas de procesamiento para la producción del combustible, así como la red de distribución de materias primas y productos.

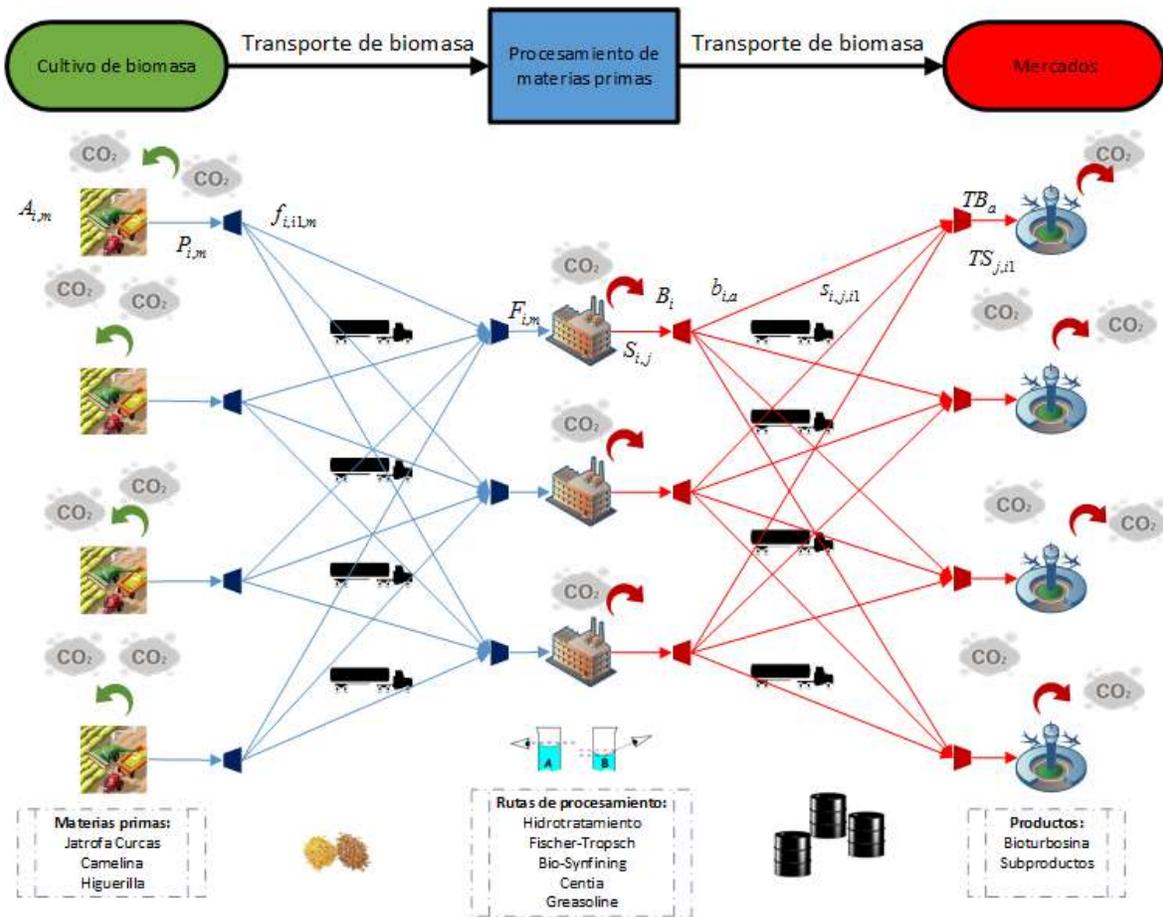


Figura 10. Superestructura de la cadena de suministros para la producción de bioturbinosa.

6.2. MODELO MATEMÁTICO

Área de cultivo

El área de cultivo total usada ($A_{i,m}$) para la labranza de la materia prima (m) en el sitio (i), será la suma del área actual usada ($A_{i,m}^{Exist}$), más el área nueva que se pueda disponer ($A_{i,m}^{New}$)

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

El área usada para los cultivos ($A_{i,m}$) se delimita por la cantidad de área disponible ($A_{i,m}^{\max}$); es decir, sólo se puede considerar una cantidad limitada de área para la labranza de la materia prima (m) sin que tenga un alto impacto ambiental o alguna otra consecuencia adversa.

$$A_{i,m} \leq A_{i,m}^{\max}, \forall i \in I, m \in M \quad (2)$$

Balances de masa para producción de materia prima

La producción ($P_{i,m}$) en el sitio (i) de la materia (m) es igual al factor de rendimiento en cada sitio ($\beta_{i,m}$) por el área cultivada ($A_{i,m}$) respectivamente.

$$P_{i,m} = \beta_{i,m} A_{i,m}, \forall i \in I, m \in M \quad (3)$$

El factor de eficiencia es determinado por las condiciones climáticas y las propiedades de la tierra.

Distribución de materia prima ($P_{i,m}$); la cantidad de materia prima producida es igual a la demanda de materia prima en los sitios ($f_{i,i1,m}$):

$$P_{i,m} = \sum_{il} f_{i,il,m}, \quad \forall i \in I, m \in M \quad (4)$$

Balances de masa para cada ruta de procesamiento

El flujo de materia prima en la planta ($F_{i,m}$) es igual a la suma de los flujos de materia prima enviada al sitio de instalación de la planta ($f_{il,i,m}$).

$$F_{i,m} = \sum_{il} f_{il,i,m}, \quad \forall i \in I, m \in M \quad (5)$$

Distribución de materia prima para las diversas rutas de procesamiento

Cada fuente de biomasa m en la planta de procesamiento i ($F_{i,m}$) puede ser procesado usando diferentes rutas tecnológicas ($f_{i,m,r}^{route}$):

$$F_{i,m} = \sum_r f_{i,m,r}^{route}, \quad \forall i \in I, m \in M \quad (6)$$

Balances de masa para la producción de Bioturbosina

El flujo de bioturbosina producida (B_i) es igual al flujo de materia prima ($f_{i,m,r}^{route}$) multiplicado por un valor de conversión específico para cada ruta existente ($\phi_{m,r}$).

$$B_i = \sum_m \sum_r f_{i,m,r}^{route} \phi_{m,r}, \quad \forall i \in I \quad (7)$$

El factor de eficiencia ($\phi_{m,r}$) está determinado por cada ruta de procesamiento de acuerdo a la tecnología considerada.

Producción de subproductos

Cada ruta de procesamiento tiene asociada varios subproductos de valor agregado ($S_{i,j}$), las cuales dependen del factor de eficiencia ($\alpha_{m,r,j}$):

$$S_{i,j} = \sum_m \sum_r f_{i,m,r}^{route} \alpha_{m,r,j} \quad \forall r \in R, i \in I, j \in J \quad (8)$$

El factor de eficiencia ($\alpha_{m,r,j}$) está determinado para cada ruta de acuerdo a la tecnología involucrada.

Balances de masa para la distribución de Bioturbosina y subproductos en los mercados

La cantidad total de bioturbosina en las plantas de procesamiento i ($\alpha_{m,r,j}$) debe ser distribuida a los diferentes mercados ($b_{i,a}$), los cuales corresponden a los aeropuertos:

$$B_i = \sum_a b_{i,a}, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

Donde $b_{i,a}$ corresponde al flujo de biocombustible enviado desde la biorefinería localizada en el sitio i a los aeropuertos a .

Distribución de los subproductos

Los subproductos producidos ($S_{i,j}$) pueden ser distribuidos a diferentes mercados ($s_{i,j,il}$):

$$S_{i,j} = \sum_{il} s_{i,j,il}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (10)$$

Donde $s_{i,j,il}$ corresponde al flujo de subproductos j desde la biorefinería localizada en el sitio i enviado al mercado il .

Bioturbosina total en los diferentes mercados

El total de bioturbosina es determinado como sigue:

$$TB_a = \sum_i b_{i,a}, \forall a \in A \quad (11)$$

Total de subproductos en los diferentes mercados

El total de subproductos en los mercados ($TS_{j,il}$) es igual a la suma de los subproductos enviados a los diferentes mercados desde las diferentes plantas de procesamiento ($s_{i,j,il}$):

$$TS_{j,il} = \sum_i s_{i,j,il}, \forall j \in J, il \in I1 \quad (12)$$

Demanda máxima de bioturbosina en los diferentes mercados

La cantidad de bioturbosina en los mercados (TB_a) debe ser menor que la máxima cantidad necesitada para cada mercado (DB_a^{\max}):

$$TB_a \leq DB_a^{\max}, \forall a \in A \quad (13)$$

Demanda máxima de subproductos en los diferentes mercados

La máxima cantidad de subproductos ($DS_{j,il}^{\max}$) es determinada como sigue:

$$TS_{j,il} \leq DS_{j,il}^{\max}, \forall j \in J, il \in I1 \quad (14)$$

Costos

El costo de la materia prima ($Cost^{feedstock}$) es igual a la bioturbosina producida ($P_{i,m}$) multiplicado por el costo unitario de proceso ($UC_{i,m}^{feedstock}$):

$$Cost^{feedstock} = \sum_i \sum_m P_{i,m} UC_{i,m}^{feedstock} \quad (15)$$

El costo unitario de la materia prima $UC_{i,m}^{feedstock}$ es una función de la cantidad de fertilizantes y agua usados en los cultivos; también los costos de mano de obra deben ser considerados constantes e iguales a los precios actuales del mercado por tonelada de semilla para cada cultivo. Debe ser notado que este precio está sujeto a la volatilidad de los mercados; por lo tanto es recomendable realizar un enfoque de optimización estocástico para abordar este problema, basado en el modelo presentado en un futuro trabajo.

Costo de procesamiento en las biorefinerías

El costo de procesamiento ($Cost^{processing}$) es igual a la suma del proceso de materia prima ($f_{i,m,r}$) a través de las diferentes rutas, multiplicada por el costo unitario de procesamiento ($UC_{i,m,r}^{processing}$):

$$Cost^{processing} = \sum_i \sum_m \sum_r f_{i,m,r}^{route} UC_{i,m,r}^{processing} \quad (16)$$

El costo unitario de procesamiento $UC_{i,m,r}^{processing}$ depende de la tecnología considerada.

Costo de transporte

El costo de transporte ($Cost^{transportation}$) incluye el transporte de materias primas más el transporte de bioturbosina y subproductos, involucrando el correspondiente costo de transporte unitario (UTC):

$$Cost^{transportation} = \sum_i \sum_{il} \sum_m f_{i,il,m} UTC_{i,il,m}^{feedstock} + \sum_i \sum_a b_{i,a} UTC_{i,a}^{bioturbosina} + \sum_i \sum_j \sum_{il} S_{i,j,il} UTS_{i,j,il}^{subproduc} \quad (17)$$

El sistema de transporte considerado en este trabajo es por carretera; de esta manera el costo unitario de transporte depende de la distancia de un lugar a otro y esto puede variar dependiendo del tipo de sustancia transportada y el riesgo involucrado (la bioturbosina y subproductos son inflamables o explosivos).

Costo de capital para las biorefinerías

Para determinar si una biorefinería debe ser instalada o no es necesario incluir variables binarias al modelo matemático. El uso de variables binarias está relacionado a decisiones lógicas; cuando una variable binaria es igual a cero la biorefinería correspondiente no debe ser instalada.

Para este modelo matemático la variable binaria (y_i) para la activación de las plantas de procesamiento, las cuales son activadas cuando la cantidad de bioturbosina producida es más grande que el mínimo establecido para cualquier planta (B_i^{\min}) y menor que el máximo establecido para establecido para cualquier planta (B_i^{\max}).

$$B_i^{\min} y_i \leq B_i \leq B_i^{\max} y_i, \forall i \in I \quad (18)$$

También variables binarias son necesarias para activar las rutas de procesamiento ($z_{i,m,r}$), las cuales son activadas cuando la materia prima procesada ($fr_{i,m,r}$) es más grande que la capacidad mínima ($fr_{i,m,r}^{\min}$) y menor que la capacidad máxima ($fr_{i,m,r}^{\max}$) permitidas:

$$fr_{i,m,r}^{\min} z_{i,m,r} \leq fr_{i,m,r} \leq fr_{i,m,r}^{\max} z_{i,m,r} \quad \forall i \in I, m \in M, r \in R \quad (19)$$

El costo de capital para las plantas de procesamiento involucra tres términos para representar adecuadamente las economías de escala. Primeramente un costo base de instalación (FC_i^B), el cual es independiente del tamaño de la planta; éste es por lo tanto el costo de los permisos legales, terreno, entre otros. También se considera un costo de capital ($FC_{i,m,r}^{route}$) por cada ruta instalada en la refinería, y el costo de dimensionamiento de la biorefinería ($C_{i,m,r}^{route}$). Entonces, el costo de capital para las plantas de procesamiento incluye costos fijos y de operación como sigue:

$$\begin{aligned} CapCost = & \sum_i FC_i^B y_i + \sum_i \sum_m \sum_r FC_{i,m,r}^{route} z_{i,m,r} \\ & + \sum_i \sum_m \sum_r UC_{i,m,r}^{route} f_{i,m,r}^{route} \end{aligned} \quad (20)$$

El costo de capital fue anualizado considerando una vida útil de 20 años, y un interés del 15 % anual.

Ventas

Las ventas totales (*Sales*) son el resultado de sumar la multiplicación del precio unitario de

la bioturbosina por la demanda suministrada $\left(\sum_a UC_a^{bioturbosina} TB_a \right)$, similarmente para el caso

de los subproductos $\left(\sum_j \sum_{i1} UC_{j,i1}^{subproduc} TS_{j,i1} \right)$:

$$Sales = \sum_a UC_a^{bioturbosina} TB_a + \sum_j \sum_{i1} UC_{j,i1}^{subproduc} TS_{j,i1} \quad (21)$$

Función objetivo económica

El rendimiento económico total (*Profit*) es igual a la resta de todos los costos involucrados

en la cadena de suministro (producción de materia prima, procesamiento, transporte y los

costos capitales de las posibles plantas respectivamente)

$(Cost^{feedstock} + Cost^{procesing} + Cost^{transport} + CapCost)$ a las ventas totales (*Sales*) como sigue:

$$Profit = Sales - Cost^{feedstock} - Cost^{procesing} - Cost^{transportation} - CapCost \quad (22)$$

Captura de CO₂

La captura de CO₂ por cultivo de materias primas (*CMPCO₂*) es las sumas de las áreas

cultivadas multiplicadas ($A_{i,m}$) por su correspondiente parámetro de captación de CO₂ ($CMP_{i,m}$):

$$CMPCO_2 = \sum_i \sum_m A_{i,m} CMP_{i,m} \quad (23)$$

El parámetro unitario de captura de CO₂ ($CMP_{i,m}$) depende de la composición de las semillas, y debe ser experimentalmente medido.

Emisiones de CO₂ por transporte de materia prima

La producción de CO₂ por transporte de materia prima $TMPCO_2$ es igual a la suma de todos los flujos de materia prima ($f_{i,i1,m}$) multiplicados por un parámetro de emisión de CO₂

($TMP_{i,i1,m}$):

$$TMPCO_2 = \sum_i \sum_{i1} \sum_m f_{i,i1,m} TMP_{i,i1,m} \quad (24)$$

El parámetro de emisión de CO₂ asociado al transporte depende de la cantidad de combustible (Diésel para este trabajo) por kilómetro y la cantidad de materia prima transportada de un lugar a otro.

Emisiones de CO₂ por transporte de bioturbosina

Las emisiones asociadas al transporte de bioturbosina desde las diferentes plantas de procesamiento hasta los mercados ($TBTCO_2$) son igual a la cantidad transportada ($b_{i,a}$) multiplicada por un factor unitario de emisiones por transporte de la bioturbosina ($TBT_{i,a}$).

$$TBTCO_2 = \sum_i \sum_a b_{i,a} TBT_{i,a} \quad (25)$$

Emisiones de CO₂ por transporte de subproductos

Las emisiones producidas por el transporte de subproductos ($TSPCO_2$) son iguales a los subproductos transportados ($s_{i,j,il}$) multiplicados por un parámetro unitario de emisiones de transporte ($TSP_{i,j,il}$):

$$TSPCO_2 = \sum_i \sum_j \sum_{il} s_{i,j,il} TSP_{i,j,il} \quad (26)$$

Las emisiones producidas asociadas al procesamiento de materias primas ($PMPCO_2$) son iguales al flujo de materia prima procesada ($fr_{i,m,r}$) multiplicado por el correspondiente factor de emisiones unitarias ($PMP_{i,m,r}$):

$$PMPCO_2 = \sum_i \sum_m \sum_r fr_{i,m,r} PMP_{i,m,r} \quad (27)$$

Las emisiones producidas asociadas al consumo de bioturbosina ($BTCO_2$) son iguales a la cantidad de bioturbosina usada (TB_a) multiplicado por las emisiones unitarias (BT_a):

$$BTCO_2 = \sum_a TB_a BT_a \quad (28)$$

El parámetro de emisión unitaria (BT_a) depende de la cantidad de carbono presente en el biocombustible, y la combustión es considerada completa.

Las emisiones producidas asociadas al consumo de subproductos ($SPCO_2$) son iguales a la cantidad de subproductos usados ($TS_{j,il}$) multiplicado por un factor unitario de emisiones ($SP_{j,il}$):

$$SPCO_2 = \sum_i \sum_m TS_{j,i1} SP_{j,i1} \quad (29)$$

El parámetro de emisión unitario ($SP_{j,i1}$) depende del contenido de carbono en los subproductos, la combustión es considerada completa.

Función objetivo ambiental

Las emisiones totales producidas asociadas a la cadena de suministros ($TOTALCO_2$) son obtenidas sumando las emisiones asociadas al transporte, producción y uso de bioturbosina y subproductos, y restando de este término la captura de dióxido de carbono por el cultivo de las materias primas:

$$TOTALCO_2 = TMPCO_2 + TBTCO_2 + TSPCO_2 + PMPCO_2 + BTCO_2 + SPCO_2 - CMPCO_2 \quad (30)$$

De esta forma, el objetivo de formulación y optimización es maximizar la ganancia (dada en la ecuación (22)) y minimizar las emisiones (dadas en la ecuación (30)), sujeto al resto de las ecuaciones, lo cual constituye un problema lineal mixto-entero multi-objetivo (MILP). Para resolver este problema multi-objetivo, el método épsilon-restricción fue implementado (ver Santibáñez-Aguiar et al. 2014). Debe ser notado que una de las principales limitaciones de la formulación propuesta está asociada a la disponibilidad de parámetros involucrados. Además, un punto importante es que este problema de optimización puede ser fácilmente resuelto.

6.3. CASOS DE ESTUDIO

6.3.1. Máxima utilidad considerando economías de escala

Caso de estudio 1

Se determina la cadena de suministros en México que maximice la ganancia 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 que tiene una capacidad máxima y mínima de producción; en cada planta de procesamiento puede haber hasta cinco rutas diferentes de proceso, con diferentes rendimientos y productos secundarios. Los mercados o sitios de consumos son cada uno de los estados del país, y la cantidad producida de bioturbosina queda acotada por la demanda de cada estado.

6.3.2. Máxima utilidad considerando economías de escala y la producción de bioturbosina limitada por la demanda del mercado nacional

Caso de estudio 2

Se determina y optimiza la cadena de suministros que satisfaga la demanda de cada uno de los mercados en México 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 que tiene una capacidad máxima y mínima de producción. En cada planta de proceso puede haber hasta cinco rutas diferentes de proceso, con diferentes rendimientos y productos secundarios; los mercados o sitios de consumos son cada uno de los estados del país.

6.3.3. Máxima utilidad despreciando economías de escala

Caso de estudio 3

Se determina la cadena de suministros en México que maximice la ganancia 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 proceso que tiene una capacidad máxima de producción y una capacidad mínima igual con cero. En cada planta de proceso puede haber hasta cinco rutas diferentes de proceso, con diferentes rendimientos y productos secundarios. Los mercados o sitios de consumos son cada uno de los estados del país y la cantidad producida de bioturbosina queda acotada por la demanda de cada mercado; en este caso la producción debe ser mayor o igual que la demanda de cada estado.

6.3.4. Máxima utilidad despreciando economías de escala y considerando la producción limitada por demanda del mercado nacional

Caso de estudio 4

Se determina y optimiza la cadena de suministros que satisfaga la demanda de cada uno de los mercados en México 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 que tiene una capacidad máxima de producción y una capacidad mínima igual con cero; en cada planta de procesamiento puede haber hasta cinco rutas diferentes de proceso, con diferentes rendimientos y productos secundarios. Los mercados o sitios de consumos son cada uno de los estados del país, y la cantidad producida de bioturbosina queda acotada por

la demanda de cada mercado; en este caso la producción debe ser igual que la demanda de cada estado.

6.3.5. Curva Pareto

Curva Pareto

Se determina la cadena de suministros en México que maximice la ganancia, luego se determina la cadena de suministros en México que minimice las emisiones de CO₂; Una vez determinados el punto máximo y mínimo, se calculan soluciones óptimas de máxima ganancia e intermedias para cantidades fijas de CO₂ liberado a la atmósfera.

7. RESULTADOS

En este trabajo se presenta el caso de estudio de México, en el cual se satisface la demanda de turbosina mediante el uso de biocombustibles, producidos a partir de las fuentes de biomasa disponibles, área de cultivo disponible y los mercados existentes (aeropuertos). Los datos requeridos fueron obtenidos de reportes de PEMEX (2010), SAGARPA-SIAP (2011) y SEMARNAT (2012). La **Tabla 2** muestra los principales parámetros económicos y la **Tabla 3** muestra los principales parámetros de captura y emisiones de CO₂ utilizados en el modelo matemático. Información adicional se encuentra en el apéndice **11.1**.

Tabla 2. Precios y costos unitarios usados en el modelo matemático

Producto	Precio USD\$/t
Turbosina	870
Diésel verde	1,044
Gases (C1-C2)	882
Gas LP	700
Natfa	700
Materia prima	Costo USD\$/t
Jatrofa Curcas	235.5
Camelina	226.6
Higuerilla	217.7
Costo de transporte, USD\$/t km	1.87
Costo de procesamiento	
Ruta	Costo USD\$/t
Greasoline	44.1
Fischer-Tropsch	36.8
Hidrotratamiento	22.1
Bio-Synfining	29.4
Centia	29.4

Tabla 3. Parámetros unitarios de emisiones de CO₂

Capturas por cultivo de materia prima, t CO₂/t de biomasa	
Jatrofa Curcas	2.3
Camelina	2.4
Higuerilla	2.5
Emisiones por proceso de materia prima, t CO₂/t materia prima	
Greasoline	0.0981
Fischer-Tropsch	0.10065
Hidrotratamiento	0.0549
Bio-Synfining	0.03015
Centia	0.04785
Emisiones por transporte, t CO₂/t km	
0.0003	
Emisiones por consumo de productos, t CO₂/t	
Turbosina	3.33
Diésel verde	3.34
Gases (C1-C2)	2.9
Gas LP	3,0
Natfa	3,4

7.1. MÁXIMA UTILIDAD CONSIDERANDO ECONOMÍAS DE ESCALA

Caso de estudio 1

En el primer caso fue considerado el Máximo beneficio económico, sin incluir las emisiones de dióxido de carbono. El resultado económico para este escenario es mostrado en la **Tabla 4**. Las ventas totales en este escenario son M USD\$ 3200 por año, mientras que el costo total es de M USD \$ 3000 por año; el cual está constituido por 31 % por el costo de materias primas, 4 % por el costo de proceso, 59% por el costo de transporte y 6 % por el costo de capital. En esta tabla también se puede ver que la contribución más grande del costo total es el transporte, seguido por el costo de la materia prima. La representación gráfica de esta solución se puede ver en la **Figura 11** donde las principales materias primas usadas son Jatrofa e Higuierilla, las cuales se obtienen desde Tamaulipas, el área necesaria para el cultivo de biomasa es 2507995.8 ha y esta cantidad es igual a la totalidad del área disponibles en el estado, por lo que la producción de biomasa y bioturbosina para este caso está limitada por la disponibilidad de territorio de cultivo; es importante mencionar que este estado tiene el mejor potencial productivo en México, de acuerdo al INIFAP (2016). La biorefinería involucrada debe ser instalada en Tamaulipas, y su capacidad es de 1.5 Mt por año. Los principales mercados donde la bioturbosina es distribuida son Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Guanajuato, Zacatecas, Aguascalientes, Querétaro, Coahuila, Hidalgo, Michoacán, Tlaxcala, Jalisco, Veracruz, Puebla, México, y la ciudad de México. Datos adicionales para la cadena de suministros asociada a este escenario pueden ser vistos en la **Tabla 5**.

Tabla 4. Resultados económicos para los casos estudiados.

Concepto (M USD \$/año)	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Costo de materia prima	800	1000	9000	4000	2869
Costo de procesamiento	100	200	900	600	561
Costo de transporte	2000	5000	1000	2000	1809
Costo de capital	100	200	2000	1000	998
Ventas totales	3200	4000	30000	10000	7919
Ganancia	200	-3000	20000	6000	1682



Figura 11. Representación esquemática para el caso de estudio 1.

Tabla 5. Distribución de bioturbosina para el Caso 1. Único punto de producción y distribución (TAMAULIPAS).

Planta/Mercado	Distancia desde Tamaulipas (km)	Demanda (kt/año)	Bioturbosina distribuida (kt/año)	% Satisfacción
Tamaulipas	0	35.6	35.6	100
Nuevo León	284	271	271	100
San Luis Potosí	332	17.4	17.4	100
Guanajuato	507	44.5	44.5	100
Zacatecas	516	14.4	14.4	100
Aguascalientes	518.9	18.8	18.8	100
Querétaro	523	17	17	100
Coahuila de Zaragoza	537	18.5	18.5	100
Hidalgo	634	1.53	1.53	100
Michoacán de Ocampo	652	21.7	21.7	100
Tlaxcala	670	3.58	3.58	100
Jalisco	684	390	390	100
Veracruz	688	54.9	54.9	100
Puebla	699	12.9	12.9	100
México	707	30.8	30.8	100
Distrito Federal	719	1210	540	45
Durango	803	10.8	0	0
Morelos	810	2.2	0	0
Colima	878	9.67	0	0
Nayarit	888	5.72	0	0
Guerrero	998	36.1	0	0
Chihuahua	1104	61.9	0	0
Oaxaca	1173	42.9	0	0
Tabasco	1184	41.3	0	0
Sinaloa	1261	73.1	0	0
Chiapas	1266	39	0	0
Campeche	1565	27.8	0	0
Baja California Sur	1703	140	0	0
Yucatán	1736	51.7	0	0
Quintana Roo	1758	626	0	0
Sonora	1796	52.7	0	0
Baja California	2323	164	0	0

7.2. MÁXIMA UTILIDAD CONSIDERANDO ECONOMÍAS DE ESCALA Y LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA LIMITADA POR LA DEMANDA DEL MERCADO NACIONAL

Este caso considera la satisfacción de la demanda completa en todos los mercados mientras que el beneficio económico es también considerado. El resultado económico para este escenario es mostrado en la **Tabla 4**. Las ventas totales en este escenario son M USD \$ 4000 por año, mientras que el costo total es de M USD \$ 7000 por año; el cual está constituido por 19 % por el costo de materias primas, 2 % por el costo de proceso, 76% por el costo de transporte y 3 % por el costo de capital. Cuando la demanda de bioturbosina es completamente satisfecha, la contribución del costo de transporte es más grande que en el escenario previo. La representación gráfica de esta solución se puede ver en la **Figura 12**, donde las principales materias primas usadas son Jatrofa e Higuierilla, las cuales son obtenidas desde Tamaulipas y Jalisco. El área necesaria para el cultivo de biomasa es 2507995.8 ha en Tamaulipas y 1406290 ha en Jalisco, el área de cultivo indicada para Tamaulipas es igual al área total disponible mientras que en Jalisco es 65% del área total disponible. Las biorefinerías involucradas deben ser instaladas en Tamaulipas y Jalisco, sus capacidades son 1.1 Mt y 1.7 Mt por año, respectivamente. Los mercados donde la bioturbosina es distribuida son todos los estados de la república Mexicana. Datos adicionales para la cadena de suministro asociada con este escenario son mostrados en las **Tablas 6 y 7**. Los datos de este escenario hacen evidente que con la finalidad de disminuir los costos de transporte, la bioturbosina debe ser producida con la biomasa que es cultivada cerca de los aeropuertos donde ésta va a ser usada.



Figura 12. Representación esquemática para el caso de estudio 2.

Tabla 6. Producción y distribución de bioturbosina desde Jalisco.

Planta/Mercado	Distancia desde Jalisco (km)	Demanda (kt/año)	Bioturbosina distribuida (kt/año)	% satisfacción
Aguascalientes	220.1	19	19	100
Baja California	2052	164	164	100
Baja California Sur	1140	140	140	100
Campeche	1673	28	0	0
Coahuila de Zaragoza	950	19	0	0
Colima	196	10	10	100
Chiapas	1373	39	0	0
Chihuahua	1167	62	0	0
Distrito Federal	537	1210	650	54
Durango	624	11	0	0
Guanajuato	272	45	45	100
Guerrero	775	36	36	100
Hidalgo	564	2	0	0
Jalisco	0	390	390	100
México	472	31	31	100
Michoacán de Ocampo	288	22	22	100
Morelos	566	2	2	100
Nayarit	206	6	6	100
Nuevo León	796	271	0	0
Oaxaca	997	43	0	0
Puebla	672	13	0	0
Querétaro	350	17	0	0
Quintana Roo	1858	626	0	0
San Luis Potosí	333	17	0	0
Sinaloa	687	73	73	100
Sonora	1354	53	53	100
Tabasco	999	41	41	100
Tamaulipas	684	36	0	0
Tlaxcala	646	4	0	0
Veracruz	799	55	0	0
Yucatán	1843	52	0	0
Zacatecas	341	14	0	0

Tabla 7. Producción y distribución de bioturbosina desde Tamaulipas.

Planta/Mercado	Distancia desde Tamaulipas (km)	Demanda (kt/año)	Bioturbosina distribuida (kt/año)	% satisfacción
Aguascalientes	518.9	19	0	0
Baja California	2323	164	0	0
Baja California Sur	1703	140	0	0
Campeche	1565	28	28	100
Coahuila de Zaragoza	537	19	19	100
Colima	878	10	0	0
Chiapas	1266	39	39	100
Chihuahua	1104	62	62	100
Distrito Federal	719	1210	561	46
Durango	803	11	11	100
Guanajuato	507	45	0	0
Guerrero	998	36	0	0
Hidalgo	634	2	2	100
Jalisco	684	390	0	0
México	707	31	0	0
Michoacán de Ocampo	652	22	0	0
Morelos	810	2	0	0
Nayarit	888	6	0	0
Nuevo León	284	271	271	100
Oaxaca	1173	43	43	100
Puebla	699	13	13	100
Querétaro	523	17	17	100
Quintana Roo	1758	626	626	100
San Luis Potosí	332	17	17	100
Sinaloa	1261	73	0	0
Sonora	1796	53	0	0
Tabasco	1184	41	0	0
Tamaulipas	0	36	36	100
Tlaxcala	670	4	4	100
Veracruz	688	55	55	100
Yucatán	1736	52	52	100
Zacatecas	516	14	14	100

7.3. MÁXIMA UTILIDAD DESPRECIANDO ECONOMÍAS DE ESCALA

Los resultados económicos para este escenario son mostrados en la **Tabla 4**. Las ventas totales para este escenario corresponden a M USD \$ 30000 por año, mientras que el costo total es M USD \$ 10000 por año; el cual está constituido por el 70% de costo de materia prima, 7 % el costo de procesamiento, 8 % costo de transporte y 15 % costo de capital. La representación esquemática de esta solución es mostrada en la **Figura 13**, en la cual las principales materias primas usadas fueron Jatrofa e Higuierilla, y estas materias primas son obtenidas de cada estado de la República Mexicana donde hay recursos disponibles para su cultivo. Las biorefinerías son instaladas en cada estado de México, excepto en Baja California Sur y Baja California Norte porque no hay área disponible para el cultivo de materia prima en estos estados. Los principales mercados donde el combustible es distribuido son todos los estados de la República Mexicana. En este escenario, las materias primas son cultivadas en cada estado, siendo así el costo de materia prima la mayor contribución al costo total. Una alternativa para este caso podría ser la mezcla de aceite usado, lo cual podría tener un impacto positivo en el medio ambiente. Estos resultados son consistentes con la iniciativa de Aeropuertos y Servicios Auxiliares de México, una entidad gubernamental que requiere de ambos combustibles, turbosina fósil y bioturbosina, para los aeropuertos de México; la cual está promoviendo el desarrollo de las cadenas de suministros para las biorefinerías en cada estado.



Figura 13. Representación esquemática para el caso de estudio 3.

7.4. MÁXIMA UTILIDAD DESPRECIANDO ECONOMÍAS DE ESCALA Y

CONSIDERANDO LA PRODUCCIÓN LIMITADA POR DEMANDA DEL MERCADO NACIONAL

Los resultados económicos para este escenario son mostrados en la **Tabla 4**. Las ventas totales para este escenario son M USD \$ 10000 por año, mientras que el costo total es M USD \$ 7000 por año; el cual está constituido por 55 % de costo de materia prima, 9 % del costo de procesamiento, 22 % del costo de transporte y 15 % de costo de capital. La representación esquemática para esta solución es mostrada en la **Figura 14**, donde las principales materias primas usadas fueron Jatropa e Higuierilla, las cuales son obtenidas de cada estado de la República Mexicana. Las biorefinerías asociadas a este escenario son

instaladas en cada estado de México, excepto en Baja California Sur y Baja California Norte porque no hay área disponible para el cultivo de materia prima. Los principales mercados donde el combustible es distribuido son todos los estados de la República Mexicana.



Figura 14. Representación esquemática para el caso de estudio 4.

7.5. CURVA PARETO

En este caso, el método ϵ -restricción es aplicado para obtener soluciones compensadas o equilibradas entre beneficio económico y emisiones de dióxido de carbono; estas soluciones compensadas son mostradas en la **Figura 15**. En esta figura las soluciones encima de la curva son infactibles, mientras que las soluciones debajo de la curva son subóptimas (pueden ser mejoradas). Esta figura es muy útil para los tomadores de decisiones, para determinar la solución que mejor satisfaga las necesidades para un caso específico.

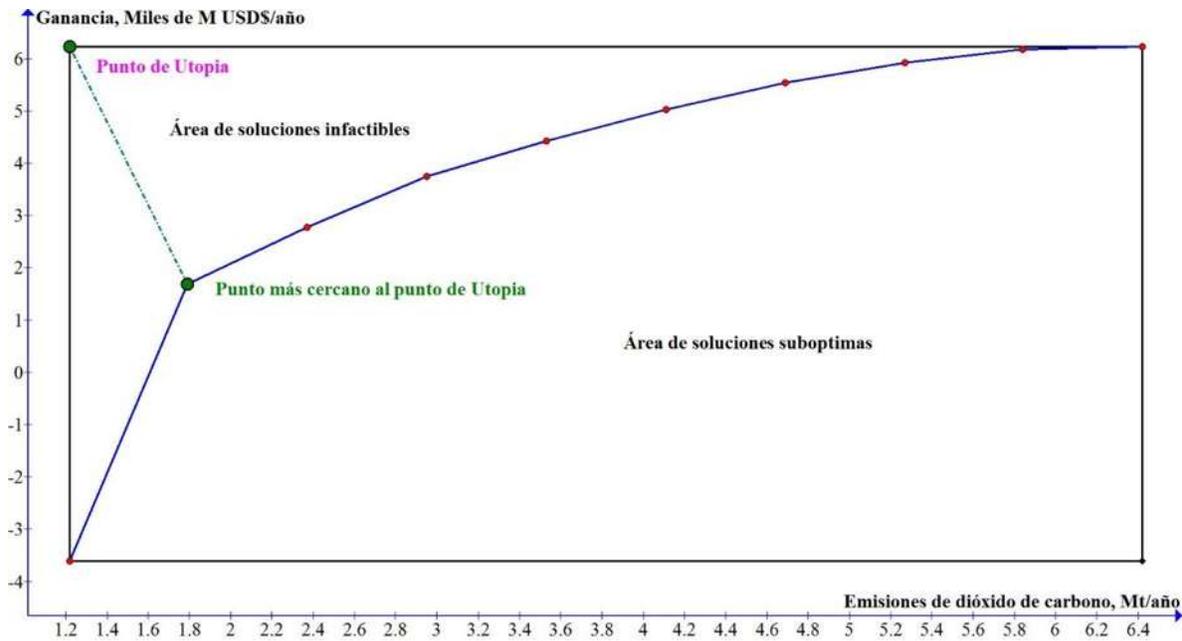


Figura 15. Curva Pareto, Emisiones de CO₂ vs Ganancia.

La **Figura 15** muestra la curva Pareto correspondiente a la producción de la demanda total de bioturbosina en México, donde es posible localizar la mejor solución (el punto más cercano al punto de utopía). El punto de utopía es la solución deseada, pero este 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 estar juntos porque hay cierta relación proporcional entre ellos. Por lo tanto, para reducir las emisiones de dióxido de carbono de 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. En la gráfica todos los puntos marcados de color rojo sobre la línea azul son soluciones factibles y óptimas (determinadas mediante el método épsilon-restricción); mientras que cualquier punto localizado debajo de la línea azul es una solución factible pero que puede ser mejorada. De acuerdo con la explicación anterior, la mejor solución posible (solución compensada) es la

que corresponde al punto sobre la línea azul más cercano al punto de utopía (punto marcado en color verde).

7.6. SOLUCIÓN COMPENSADA

Este caso considera la satisfacción de la demanda total de bioturbosina de todos los mercados considerados, mientras que el beneficio global y el impacto ambiental son optimizados. Los resultados económicos para este escenario son mostrados en la **Tabla 4**. Las ventas totales para este caso son M USD \$ 7919 por año, mientras que el costo total es M USD \$ 6237 por año; el cual está constituido por 46 % de costo de materia prima, 9 % costo de procesamiento, 29 % de costo de transporte y 16 % de costo de capital. Los resultados ambientales para este escenario son mostrados en al **Tablas 8**. . El CO₂ capturado total por el cultivo de materia prima es 23170 kt por año, las emisiones asociadas al transporte de bioturbosina son 9 kt por año, las emisiones asociadas al procesamiento de materia prima son 3585 kt por año, y las emisiones asociadas al consumo de bioturbosina y subproductos son 10645 kt por año y 10721 kt por año, respectivamente, siendo así que las emisiones netas son 1790 kt por año. La suma de todas las emisiones puede ser considerada equivalente a la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera si la bioturbosina es producida del petróleo (24960 kt por año). Por lo que la producción de bioturbosina a partir de biomasa disminuye 93 % de las emisiones liberadas a la atmósfera por su consumo. Una representación esquemática de la solución Pareto puede ser vista en la **Figura 16**.

La **Tabla 9** muestra los valores numéricos para las capacidades de producción por estado, de materias prima, turbosina y subproductos para el escenario número cinco.

Tabla 8. Resultados ambientales para caso 5.

CO₂ emisiones (kt/año)	
Cultivo de materias primas	-23170
Transporte de materias primas	0
Transporte de bioturbosina	9
Transporte de subproductos	0
Procesamiento de materias primas	3585
Consumo de bioturbosina	10645
Consumo de subproductos	10721

Tabla 9. Producción de materias primas, bioturbosina y subproductos para el Caso 5.

Estado de la república	Jatrofa, t/año	Higuerilla, t/año	Bioturbosina, t/año	Diésel, t/año	Gas (C1-C2), t/año	Gas LP, t/año	Nafta, t/año
Aguascalientes	0	0	0	0	0	0	0
Baja California	0	0	0	0	0	0	0
Baja California Sur	0	0	0	0	0	0	0
Campeche	150000	0	27000	16000	53000	25000	4400
Coahuila de Zaragoza	0	0	0	0	0	0	0
Colima	0	0	0	0	0	0	0
Chiapas	280000	0	52000	31000	100000	48000	8400
Chihuahua	210000	0	39000	23000	76000	36000	6400
Distrito Federal	0	0	0	0	0	0	0
Durango	0	0	0	0	0	0	0
Guanajuato	520000	0	96000	57000	190000	88000	16000
Guerrero	570000	0	110000	62000	200000	96000	17000
Hidalgo	0	0	0	0	0	0	0
Jalisco	370000	420000	200000	53000	210000	130000	11000
México	250000	0	46000	27000	88000	42000	7400
Michoacán de Ocampo	580000	0	110000	63000	210000	98000	17000
Morelos	410000	0	77000	45000	150000	70000	12000
Nayarit	0	0	0	0	0	0	0
Nuevo León	290000	0	54000	32000	100000	49000	8600
Oaxaca	230000	0	43000	25000	83000	39000	6900
Puebla	250000	0	47000	28000	91000	43000	7600
Querétaro	140000	0	26000	15000	51000	24000	4200
Quintana Roo	0	0	0	0	0	0	0
San Luis Potosí	94000	0	17000	10000	34000	16000	2800
Sinaloa	390000	0	73000	43000	140000	67000	12000
Sonora	200000	0	38000	22000	74000	35000	6100
Tabasco	0	0	0	0	0	0	0
Tamaulipas	1400000	0	250000	150000	490000	230000	41000
Tlaxcala	0	0	0	0	0	0	0
Veracruz	1400000	0	270000	160000	520000	240000	43000
Yucatán	280000	0	52000	31000	100000	48000	8400
Zacatecas	230000	0	42000	25000	82000	39000	6800



Figura 16. Representación esquemática para el caso de estudio 5.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se presenta un enfoque de optimización para la cadena de suministros asociada al nuevo mercado de la bioturbosina. El modelo incorpora varios factores incluyendo la selección óptima de las fuentes de biomasa, sitios de cultivo y la localización de las biorefinerías, también como las tecnologías de procesamiento. Además, el modelo considera la distribución óptima de materiales a través de la cadena de suministros. Dos funciones objetivo son consideradas simultáneamente, incluyendo la maximización del beneficio global y la minimización de las emisiones de dióxido de carbono asociadas.

El caso de estudio para México fue considerado bajo diferentes escenarios y condiciones. En todos los casos de estudio fue determinado que el factor más importante para la cadena de suministros está asociado con el transporte de las materias primas. Los resultados sugieren instalar pequeñas fábricas de procesamiento distribuidas a lo largo de la cadena de suministros. Frecuentemente, las mejores rutas de procesamiento seleccionadas fueron Bio-Synfining® y Centia ®. Las mejores materias primas fueron Jatrofa e Higuierilla, mientras que la Camelina 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.

9. NOMENCLATURA

Índices

a	Diferentes mercados de bioturbosina.
i	El sitio de cultivo usado para cada materia prima, en éste entran los estados de la República.
il	El sitio de procesamiento usado para cada materia prima, en éste entran los estados de la República.
j	El tipo de subproducto que se obtiene a partir de cada ruta de procesamiento.
m	El tipo de materia prima, considerando Jatrofa, Camelina e Higuierilla.
r	Representa la ruta de producción entre los considerados son: Fischer-Tropsch, Hidrotratamiento, Bio-Synfining, Centia y Greasoline.

Variables continuas positivas

$A_{i,m}^{New}$	Área nueva disponible para el cultivo de materia prima.
$A_{i,m}$	El área de cultivo total usada.
B_i	Bioturbosina producida en cada planta por las diferentes rutas de procesamiento.
$b_{i,a}$	Flujo de bioturbosina desde la planta i hacia el mercado a .
$BTCO_2$	Producción de CO_2 por consumo de bioturbosina.
$Cost^{feedstok}$	Costo total materia prima.

$Cost^{processing}$	Costo total de procesamiento en las biorefinerías.
$Cost^{transportation}$	Costo total de transporte.
$CapCost$	Costo total de capital.
$CMPCO_2$	Captación de CO_2 por cultivo de materias primas.
$F_{i,m}$	Flujo de materia prima a la planta.
$f_{i,il,m}$	Flujo de materia prima m del sitio de cultivo i al sitio de procesamiento il .
$fr_{i,m,r}$	Flujo de materia prima para cada ruta de procesamiento dentro de la planta.
$Profit$	Rendimiento total.
$P_{i,m}$	Producción de materia prima m en el sitio i .
$PMPCO_2$	Producción de CO_2 por procesamiento de materia prima.
$S_{i,j}$	Flujo de subproducto j en el sitio i .
$s_{i,j,il}$	Flujo del subproducto j desde la planta i hacia el mercado il .
$Sales$	Vetas
$SPCO_2$	Producción de CO_2 por consumo de subproductos.
TB_a	Bioturbosina total en los diferentes mercados.
$TS_{j,il}$	Total de subproducto j en los diferentes mercados il .
$TMPCO_2$	Producción de CO_2 por transporte de materia prima.

$TBTCO_2$ Producción de CO₂ por transporte de bioturbosina.

$TSPCO_2$ Producción de CO₂ por transporte de subproductos.

$TOTALCO_2$ Total CO₂ producido.

Variables binarias

y_i Variable binaria para la existencia o no de una planta de procesamiento en el sitio i .

z_i Variable binaria para el uso o no de una ruta r de procesamiento en el sitio i .

Parámetros

$A_{i,m}^{Exist}$ Área actual usada para el cultivo de materia prima.

$A_{i,m}^{max}$ Áreas disponibles para el cultivo de materia prima.

B_i^{min} Capacidad mínima de producción de bioturbosina en la planta i .

B_i^{max} Capacidad máxima de producción de bioturbosina en la planta i .

BT_a Toneladas de CO₂ producidas por tonelada de bioturbosina consumida en cada mercado a .

$CMP_{i,m}$ Toneladas de CO₂ captadas por Hectárea cultivada de materia prima m en el sitio i .

DB_a^{max} Demanda máxima de bioturbosina.

$DS_{j,i1}^{max}$ Demanda máxima de subproductos.

$f_{i,m,r}^{\min}$	Flujo mínimo de materia prima para cada ruta de procesamiento.
$f_{i,m,r}^{\max}$	Flujo máximo de materia prima para cada ruta de procesamiento.
FC_i^B	Costo base de instalación de la planta en el sitio i .
$FC_{i,m,r}^{route}$	Costo base de instalación del equipo de proceso para la ruta r .
$PMP_{i,m,r}$	Toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de materia prima m procesada en cualquier sitio i por la ruta r .
$SP_{j,i1}$	Toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de subproducto j consumida en el mercado $i1$.
$TMP_{i,i1,m}$	Toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de materia prima m transportada del sitio de cultivo i a cualquier sitio de procesamiento $i1$.
$TBT_{i,a}$	Toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de bioturbosina transportada del sitio de proceso i a cualquier mercado a .
$TSP_{i,j,i1}$	Toneladas de CO ₂ producidas por tonelada de subproducto j transportada del sitio de proceso i a cualquier mercado $i1$.
$UC_{i,m}^{feedstok}$	Costo unitario de materia prima m cultivada en el sitio i .
$UC_{i,m,r}^{processing}$	Costo unitario de procesamiento de la materia prima m en la planta i a través de la ruta r .
$UTC_{i,i1,m}^{feedstok}$	Costo unitario de transporte de la materia prima m del sitio i al mercado $i1$.

$UTC_{i,a}^{bioturbosina}$	Costo unitario de transporte de bioturbosina del sitio i al mercado a .
$UTC_{i,j,i1}^{subproduc}$	Costo unitario de transporte de los subproductos del sitio i al mercado $i1$.
$UC_{i,m,r}^{route}$	Costo de dimensionamiento del equipo de proceso para la ruta r .
$UC_a^{bioturbosina}$	Precio unitario de la bioturbosina en el mercado a .
$UC_{j,i1}^{subproduc}$	Precio unitario de subproducto j en el mercado $i1$.
$\alpha_{m,r,j}$	Conversión de la materia prima m al subproducto j .
$\beta_{i,m}$	Factor de rendimiento del cultivo m en el sitio i .
$\phi_{m,r}$	Conversión de la materia prima m a bioturbosina por medio cada ruta de procesamiento.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Gutiérrez-Antonio C, Romero-Izquierdo AG, Gómez-Castro FI, and Hernández S (2016) Energy Integration of a Hydrotreatment Process for Sustainable Biojet Fuel Production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 55, 8165–8175
- Chiaramonti D, Prussi M, Buffi M, Tacconi D (2014) Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels. *Applied Energy.* 136:767–774.
- Dyken VS, Bakken BH, Skjelbred HI (2010) linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing. *Energy.* 35(3):1338-1350.

- Hong DH, Tatang HS, Iman KR, Osuma F, Zarrah D, Mai XO (2013) A study on developing aviation biofuel for the Tropics: Production process—Experimental and theoretical evaluation of their blends with fossil kerosene. *Chemical Engineering and Processing*. 74:124-130.
- Il-Ho C, Kyung-Ran H, Jeong-Sik H, Kyong-Hwan L, Jin-Suk L (2015) The direct production of jet-fuel from non-edible oil in a single-step process. *Fuel*. 158:98–104.
- Kandaramath-Hari T, Yaakhog Z, Narayanan NB (2015) Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. *Renewable and Suitable Energy Reviews*, 42:1234–1244.
- Konstantinos A, Michael-Alexander K, Kyriakos DP, Kakaras E (2015) Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison. *Applied Energy*. 138:346–366.
- Köhler J, Walz R, Marscheder-Weidemann F, Thedieck B (2014) Lead markets in 2nd generation biofuels for aviation: A comparison of Germany, Brazil and the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 40:716–726.
- Moraes M, Nassar AM, Moura P, Leal R, Cortez LAB (2014) Jet biofuels in Brazil: Sustainability challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 40:716–726.
- Murillo-Alvarado PE, Guillén-Gosálbez G, Ponce-Ortega JM, Castro-Montoya AJ, Serna-González M, Jiménez L (2015) Multi-objective optimization of the supply chain of biofuels from residues of the tequila industry in Mexico. *Journal of Cleaner Production*. 108:422-441.
- Sanchez-Ramirez E, Quiroz-Ramirez JJ, Segovia-Hernandez JG, Hernandez S, Ponce-Ortega JM (2016) Economic and environmental optimization of the biobutanol purification process. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 18(2):395-411.

Santibañez-Aguilar JE, González-Campos JB, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi MM. (2011) Optimal planning of a biomass conversion system considering economic and environmental aspects. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 50(14):8558-8570.

Santibañez-Aguilar JE, Ponce-Ortega JM, González-Campos JB, Serna-González M, El-Halwagi MM (2013) Synthesis of distributed biorefining networks for the value-added processing of water hyacinth. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 1(2):284-305.

Santibañez-Aguilar JE, González-Campos JB, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi MM (2014) Optimal planning and site selection for distributed multiproduct bio refineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of Cleaner Production*. 65:270-294.

Sepulveda-González I (2012) Jet biofuel. Production of energy-related crops for commercial aircraft. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3(3):579-594.

Sitios Web

PEMEX, 2010. Memoria del trabajo 2010. Informe anual para el Ministerio de Petróleo de México. Ciudad de México, México.

www.pemex.com/files/content/Version_completa_memoria_de_labores_2010.pdf

(Acceso 30/01/2016).

SAGARPA-SIAP, 2011. Sistema Mexicano de Información sobre Agricultura y Pesca. Avance de siembra y cosecha para México. Ciudad de México, México.

www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=347

(Acceso 01/02/2016).

SEMARNAT, 2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Anuario forestal 2011. Consejo General de Comunicación Social, Dirección General de Ordenamiento Territorial y Forestal. Ciudad de México, México.

www.semarnat.gob.mx/tramites/gestionambiental/forestalsuelos/Anuarios/Anuario%20Forestal%202006.pdf.

(Acceso 05/02/2016).

INIFAP, 2016, Instituto Nacional de Silvicultura, Agricultura y Ganadería. Bioenergética en México.

<http://www.agromapas.inifap.gob.mx/potencialproductivo/index.html>

(Acceso 07/07/2016).

REG, Renewable Energy Group.

<http://regi-dev.2rmdev.com/technology/bio-synfining>

(Acceso 20/07/2016)

SINAREFI, Sistema Nacional de Recursos Filogenéticos para la Alimentación y la Agricultura.

http://www.sinarefi.org.mx/redes/red_jatropha.html

(Acceso 20/07/2016)

11. APÉNDICES

11.1. TABLAS DE PARÁMETROS

Tabla 10. $\phi_{m,r}$ Conversión de la materia prima m a bioturbosina por medio cada ruta de procesamiento.

CONVERSIÓN (%) DE MATERIA PRIMA A BIOTURBOSINA			
Ruta/Materia prima	Camelina	Higuerilla	Jatrofa
Fischer-Tropsch*	31.9	32.3	32.7
Hidrotratamiento	20.1	22.2	18.6
Bio-Synfining	67.1	70.6	67.1
Centia	65.4	79.4	79.8
Greasoline	36.6	37.4	35.1

*Las materias primas que en la práctica se utilizan (hablando de biomasa) son los desechos agrícolas, desechos orgánicos o madera; por tanto, los valores son estimaciones hechas en función del contenido de carbono de las semillas.

Tabla 11. Parámetros relacionados con la conversión de materia prima ($\alpha_{m,r,j}$)
 Conversión de la materia prima m al subproducto j).

CONVERSIÓN (%) DE MATERIA PRIMA A GAS LP			
Ruta/Materia prima	Camelina	Higuerilla	Jatrofa
Fischer-Tropsch	2.6	2.7	2.7
Hidrotratamiento	10.5	10.1	11.4
Bio-Synfining	13.36	13.07	13.15
Centia	0	0	0
Greasoline	16.8	10.5	25.04
CONVERSIÓN (%) DE MATERIA PRIMA A DIÉSEL			
Ruta/Materia prima	Camelina	Higuerilla	Jatrofa
Fischer-Tropsch	17.7	18.5	15.3
Hidrotratamiento	44	51.8	35.7
Bio-Synfining	6.09	5.8	5
Centia	17	0.6	0
Greasoline	11.4	7.6	8.1
CONVERSIÓN (%) DE MATERIA PRIMA A NAPHTHAS			
Ruta/Materia prima	Camelina	Higuerilla	Jatrofa
Fischer-Tropsch	16.4	15.1	18
Hidrotratamiento	8.7	0	16.7
Bio-Synfining	3.9	0.45	7.84
Centia	7	9.7	9.8
Greasoline	8.305	11.34	10.8
CONVERSIÓN (%) DE MATERIA PRIMA A INCOMPRESIBLES (C1-C2)			
Ruta/Materia prima	Camelina	Higuerilla	Jatrofa
Fischer-Tropsch	0	0	0
Hidrotratamiento	10.5	0	2.9
Bio-Synfining	1.51	1.59	1.51
Centia	0	0	0
Greasoline	0	0	0

Tabla 12. $\beta_{i,m}$ Factor de rendimiento del cultivo m en el sitio i .

FACTOR DE RENDIMIENTO DE CULTIVO, t/hectárea cultivada							
Estado/Materia prima	Camelina	Higuerilla	Jatrofa	Estado/Materia prima	Camelina	Higuerilla	Jatrofa
Aguascalientes*	----	----	----	Morelos	2	3.445	5
Baja California*	----	----	----	Nayarit	1	2.8	5.00
Baja California Sur	1.25	1.25	1.05	Nuevo León	0.97	2	0.61
Campeche	1.35	3	1.00	Oaxaca	1.2	0.850	1.01
Coahuila de Zaragoza	1.435	2	0.95	Puebla	0.9	2.925	0.75
Colima	1	3.945	0.82	Querétaro	0.8	4.3	1.21
Chiapas	2	2.50	0.84	Quintana Roo	0.5	3.5	1.05
Chihuahua	0.777	1.537	0.87	San Luis Potosí	1.3	2.8	1.24
Distrito Federal*	----	----	----	Sinaloa	0.9	2.28	0.869
Durango	1.435	3.531	0.97	Sonora	1.4	1.69	0.85
Guanajuato	2.2	3.0	0.95	Tabasco*	----	----	2.27
Guerrero	1.5	2.875	2.23	Tamaulipas	1.3	1.9	2.50
Hidalgo	2.4	5.0	0.460	Tlaxcala*	----	----	----
Jalisco	1.1	2.994	0.346	Veracruz	2.3	2.5	3.25
México	1.1	4.015	1.87	Yucatán	1.5	4	1.68
Michoacán de Ocampo	2.5	4.905	1.288	Zacatecas	1.18	3.08	0.65

*Estados sin áreas con potencial productivo.

Verde: experimentales y azul: comerciales

Los valores en negro son supuestos con base en los mapas de potencial productivo reportados por el INIFAP y los datos experimentales reportados en verde.

Tabla 13. Demanda de turbosina por aeropuerto.

AEROPUERTO	Miles de barriles por año	AEROPUERTO	Miles de barriles por año
Acapulco	163.4	Monterrey	2098.3
Aguascalientes	146.9	Morelia	126.3
Bajío	338.0	Nogales	1.0
Campeche	50.9	Nuevo Laredo	18.3
Cancún	4708.1	Oaxaca	152.6
Cd. del Carmen	163.4	Palenque	4.1
Cd. Juárez	199.5	Poza rica	23.2
Cd. obregón	53.3	Puebla	79.8
Cd. victoria	23.9	Puerto escondido	42.3
Chetumal	48.3	Puerto Vallarta	639.7
Chihuahua	277.4	Querétaro	111.7
Ciudad de México	9465.6	Reynosa	129.7
Colima	30.3	San José del cabo	927.2
Cozumel	115.7	San Luis Potosí	113.1
Cuernavaca	1.2	Tampico	186.4
Culiacán	312.9	Tamuín	0.3
Durango	75.3	Tapachula	42.3
Guadalajara	2393.8	Tehuacán	1.0
Guaymas	6.9	Tepic	27.7
Hermosillo	327.2	Tijuana	1153.8
Huatulco	121.7	Toluca	226.6
La paz	150.7	Torreón	140.8
Loreto	11.0	Tuxtla Gutiérrez	252.8
los Mochis	49.7	Uruapan	28.7
Manzanillo	40.3	Veracruz	316.5
Matamoros	23.0	Villahermosa	296.9
Mazatlán	184.6	Zacatecas	81.3
Mérida	374.5	Zihuatanejo	107.5
Mexicali	128.7	Total general	27377.0
Minatitlán	60.9		

11.2. CÓDIGO DEL MODELO MATEMÁTICO PROGRAMADO EN GAMS

\$TITLE BIOTURBUSINA PRODUCCION

OPTION OPTCR=0.001;

OPTION OPTCA=0.0001;

OPTION ITERLIM=10000;

OPTION RESLIM= 10000;

OPTION MIP = CPLEX;

OPTION LP = CPLEX;

OPTION NLP = CONOPT;

OPTION MINLP =DICOPT;

OPTION SYSOUT=ON;

OPTION LIMROW=100;

OPTION LIMCOL=100;

\$ONEMPTY;

SETS

A	AEROPURETO	/1*32/
I	SITIOS DE CULTIVO-PROCESAMIENTO Y MERCADOS DE SUBPRODUCTOS	/1*32/
J	TIPO DE SUBPRODUCTO	/1*4/
M	TIPO DE MATERIA PRIMA	/1*3/
R	ruta de proceso	/1*5/;

ALIAS (I,I1);

*/A= SE INCLUYEN LOS 32 ESTADOS DE LA REPÚBLICA

*/I= CORRESPONDES A LOS LUGARES DONDE SE PUEDA SEMBRAR CADA MATERIA PRIMA POSIBILIDADES EN LOS 32 ESTADOS DE LA REPUBLICA

*/J= 1=DIESEL, 2=GAS, 3=LP, 4=NAFTA

*/M= 1=CAMELINA, 2=HIGUERILLA , 3=JATROFA

*R= 2=HIDROTRATAMIENTO, 4=PROCESO CENTIA, 5=PROCESO GREASOLINE,
3=BIO-SYNFININF, 1=FISCHER TROPCH

TABLE AD(I,M) AREA DISPONIBLE PARA CULTIVOS M (HA);
TABLE AE(I,M) TOTAL DE AREA EXISTENTE (HA);
TABLE RM (I,M) RENDIMIENTO DE LA MATERIA PRIMA EN CADA SITIO
(TON/HA)
;
TABLE TETAB (M,R) FACTOR DE CONVERSIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOTURBOSINA (TON/TON)
;
TABLE ALFA (M,R,J) FACTOR DE CONVERSIÓN EN LA FORMACIÓN DE
SUBPRODUCTOS (TON/TON)
;
PARAMETER DBM(A) DEMANDA MÁXIMA DE BIOTURBOSINA EN LOS
MERCADOS (TON/AÑO)
;
TABLE DSM(J,I1) DEMANDA MÁXIMA DE SUBPRODUCTO (TON/AÑO)
;
TABLE CURM(I,M) COSTO UNITARIO DE LA PRODUCCIÓN DE MATERIA
PRIMA (\$/TON)
;
TABLE CUPRO(I,M,R) COSTO UNITARIO DE PRODUCCIÓN (\$/TON)
;
TABLE CTRM(I,M,I1) COSTO DE TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA (\$/TON)
;
TABLE CTB(I,A) COSTO DE TRANSPORTE DE BIORTURBOSINA (\$/TON)
;
TABLE CTS(I,J,I1) COSTO DE TRANSPORTE DE SUBPRODUCTO (\$/TON)
;
PARAMETER PBMIN(I) PRODUCCIÓN MÍNIMA DE BIOTURBOSINA
(TON/AÑO)

;

PARAMETER PBMAX(I) PRODUCCIÓN MÁXIMA DE BIOTURBOSINA
(TON/AÑO)

;

TABLE FRMMIN(I,M,R) FLUJO DE MATERIA PRIMA MÍNIMO PROCESADO
(TON)

;

TABLE FRMMAX(I,M,R) FLUJO DE MATERIA PRIMA MÁXIMO PROCESADO
(TON)

;

PARAMETER FCB(I) COSTO CAPITAL POR LA PRODUCCIÓN DE
BIOTURBOSINA (\$/AÑO)

;

TABLE FCR(I,M,R) COSTO CAPITAL POR LA SELECCIÓN DE LA RUTA DE
PRODUCCIÓN (\$/AÑO)

;

TABLE UCR(I,M,R) (\$/AÑO)

;

PARAMETER BP(A) PRECIO UNITARIO POR TONELADA DE
BIOTURBOSINA (\$/TON);

;

TABLE SP(J,I1) PRECIO UNITARIO POR TONEADA DE SUBPRODUCTO
(\$/TON)

;

TABLE CMP(I,M) CAPTACIÓN DE CO2 POR CULTIVO DE MATERIAS
PRIMAS EN TON POR HA

;

TABLE TMP(I,M,I1) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE
MATERIA PRIMA M TRANSPORTADA

;

TABLE TBT(I,A) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE
BIOTURBOSINA TRANSPORTADA DEL SITIO DE PROCESO I A CUALQUIER
MERCADO A

;

TABLE TSP(I,J,I1) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE SUBPRODUCTO J TRANSPORTADA DEL SITIO DE PROCESO I A CUALQUIER MERCADO I1

;

TABLE PMP(I,M,R) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE MATERIA PRIMA M PROCESADA EN CUALQUIER SITIO I POR LA RUTA R

;

PARAMETER BT(A) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE BIOTURBOSINA CONSUMIDA EN CADA MERCADO A;

;

TABLE CSP(J,I1) TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS POR TONELADA DE SUBPRODUCTO J CONSUMIDA EN EL MERCADO I1

;

VARIABLE

NP BENEFICIO GLOBAL

TOTALCO2 TOTAL CO2 PRODUCIDO;

BINARY VARIABLE

BVBY(I) ACTIVACIÓN DE COSTO CAPITAL EN LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA O NO

BVRMZ (I,M,R) VARIABLE BINARIA PARA LA ACTIVACIÓN DE FLUJO DE MATERIA PRIMA;

POSITIVE VARIABLES

AT (I,M) ÁREA TOTAL CULTIVADA CON LA MATERIA PRIMA M (HA)

AN (I,M) ÁREA NUEVA NECESARIA PARA CULTIVO (HA)

PM (I,M) PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA M EN CADA UNO DE LOS SITIOS (TON)

FMM (I,M,I1) CANTIDAD DE MATERIA PRIMA DISTRIBUIDA DEL SITIO I AL I1 (TON)

FLUXM (I,M) CANTIDAD DE MATERIA M ENVIADA A LA PLANTA (TON)

FLUR (I,M,R)	CANTIDAD DE MATERIA PRIMA EMPLEADA EN CADA RUTA DE PROCESAMIENTO (TON)
BIOP (I)	CANTIDAD DE BIOTURBOSINA PRODUCIDA (TON)
SUBP (I,J)	CANTODAD DE SUBPRODUCTO J PRODUCIDO EN EL SITIO I (TON)
BA (I,A)	CANTIDAD DE BIOTURBOSINA CONSUMIDA EN CADA AEROPUERTO (TON)
SM (I,J,I1)	CANTIDAD DE SUBPRODUCTO DISTRIBUIDA A CADA MERADO I1 (TON)
TB (A)	TOTAL DE BIOTURBOSINA EN LOS MERCADOS (TON)
TS (J,I1)	TOTAL DE SUBPRODUCTO J EN LOS MERCADOS (TON)
CRM	COSTO TOAL DE LA PRODUCCIÓN MATERIA PRIMA (\$/TON)
CPRO	COSTO TOTAL DE PROCESAMIENTO (\$/TON AÑO)
CTT	COSTO DE TRANSPORTE (\$/TON KM)
CP	COSTO CAPITAL (\$/AÑO)
SALES	VENTAS GLOBALES (\$/AÑO)

*****EMISIONES DE CO2 VARIBALES

CMPCO2	CAPTACIÓN DE CO2 POR CULTIVO DE MATERIAS PRIMAS
TMPCO2	PRODUCCIÓN DE CO2 POR TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA
TBTCO2	PRODUCCIÓN DE CO2 POR TRANSPORTE DE BIOTURBOSINA
TSPCO2	PRODUCCIÓN DE CO2 POR TRANSPORTE DE SUBPRODUCTOS
PMPCO2	PRODUCCIÓN DE CO2 POR PROCESAMIENTO DE MATERIA PRIMA
BTCO2	PRODUCCIÓN DE CO2 POR CONSUMO DE BIOTURBOSINA
SPCO2	PRODUCCIÓN DE CO2 POR CONSUMO DE SUBPRODUCTOS;

EQUATIONS

EC1(I,M)	BALANCE PARA AREA DE CULTIVO,
EC2(I,M)	RESTRICCIÓN ÁREA MÁXIMA,

- EC3(I,M) BALANCE PARA LA CANTIDAD DE MATERIA PRIMA M
PRODUCIDA,
- EC4(I,M) BALANCE DE MATERIA DISTRIBUIDA,
- EC5(I,M) BALANCE DE MATERIA EN PLANTA,
- EC6(I,M) BALANCE DE MATERIA EN LAS RUTAS DE PROCESAMIENTO,
- EC7(I) BALANCE EN LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA,
- EC8(I,J) BALANCE DE FORMACIÓN DE SUBPRODUCTOS,
- EC9(I) BALANCE DE BIOTURBOSINA USADA EN LOS AEROPUERTOS,
- EC10(I,J) DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS A MERCADOS,
- EC11 (A) BALANCE TOTAL DE BIOTURBOSINA,
- EC12(J,I1) BALANCE TOTAL DE SUBPRODUCTO J,
- EC13(A) DEMANDA MÁXIMA DE BIOTURBOSINA (TON/AÑO),
- EC14(J,I1) DEMANDA MÁXIMA DE SUBPRODUCTO (TON/AÑO),
- EC15 COSTO DE LA PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA (\$),
- EC16 COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN (\$),
- EC17 COSTO TOTAL DE TRANSPORTE (\$),
- EC18A(I) ACTIVACIÓN DE COSTO CAPITAL EN LA PRODUCCIÓN DE
BIOTURBOSINA LIMITE MINIMO,
- EC18B(I) ACTIVACIÓN DE COSTO CAPITAL EN LA PRODUCCIÓN DE
BIOTURBOSINA LIMITE MÁXIMO,
- EC19A(I,M,R) ACTIVACIÓN DE FLUJO MÍNIMO DE MATERIA PRIMA
PROCESADA,
- EC19B(I,M,R) ACTIVACIÓN DE FLUJO MÁXIMO DE MATERIA PRIMA
PROCESADA,
- EC20 COSTO CAPITAL (\$/AÑO),
- EC21 VENTAS (\$/AÑO),
- EC22 BENEFICIO GLOBAL (\$/AÑO),

***** EMISIONES DE CO2
ECIACIONES*****

- EC23 CAPTACIÓN DE CO2 POR CULTIVO DE MATERIAS PRIMAS,

- EC24 PRODUCCIÓN DE CO2 POR TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA,
- EC25 PRODUCCIÓN DE CO2 POR TRANSPORTE DE BIOTURBOSINA,
- EC26 PRODUCCIÓN DE CO2 POR TRANSPORTE DE SUBPRODUCTOS,
- EC27 PRODUCCIÓN DE CO2 POR PROCESAMIENTO DE MATERIA PRIMA,
- EC28 PRODUCCIÓN DE CO2 POR CONSUMO DE BIOTURBOSINA,
- EC29 PRODUCCIÓN DE CO2 POR CONSUMO DE SUBPRODUCTOS,
- EC30 TOTAL DE CO2 PRODUCIDO;

*MODEL*****

- EC1(I,M).. $AT(I,M)=E=AE(I,M)+ AN(I,M);$
- EC2(I,M).. $AT(I,M)=L=AD(I,M);$
- EC3(I,M).. $PM(I,M)=E=RM(I,M)*AT(I,M);$
- EC4(I,M).. $PM(I,M)=E=SUM(I1,FMM(I,M,I1));$
- EC5(I,M).. $FLUXM(I,M)=E=SUM(I1,FMM(I,M,I1));$
- EC6(I,M).. $FLUXM(I,M)=E=SUM(R,FLUR(I,M,R));$
- EC7(I).. $BIOP(I)=E=SUM((M,R),FLUR(I,M,R)*TETAB(M,R));$
- EC8(I,J).. $SUBP(I,J)=E=SUM((M,R),FLUR(I,M,R)*ALFA(M,R,J));$
- EC9(I).. $BIOP(I)=E=SUM(A,BA(I,A));$
- EC10(I,J).. $SUBP(I,J)=E=SUM(I1,SM(I,J,I1));$
- EC11(A).. $TB(A)=E=SUM(I,BA(I,A));$
- EC12(J,I1).. $TS(J,I1)=E=SUM(I,SM(I,J,I1));$
- EC13(A).. $TB(A)=L=DBM(A);$
- EC14(J,I1).. $TS(J,I1)=L=DSM(J,I1);$
- EC15.. $CRM=E=SUM((I,M),PM(I,M)*CURM(I,M));$
- EC16.. $CPRO=E=SUM((I,M,R),FLUR(I,M,R)*CUPRO(I,M,R));$

EC17..
CTT=E=SUM((I,M,I1),FMM(I,M,I1)*CTRM(I,M,I1))+SUM((I,A),BA(I,A)*CTB(I,A))+SUM((I,J,I1),SM(I,J,I1)*CTS(I,J,I1));

EC18A(I).. PBMIN(I)*BVBY(I)=L=BIOP(I);

EC18B(I).. PBMAX(I)*BVBY(I)=G=BIOP(I);

EC19A(I,M,R).. FRMMIN(I,M,R)*BVRMZ(I,M,R)=L=FLUR(I,M,R);

EC19B(I,M,R).. FRMMAX(I,M,R)*BVRMZ(I,M,R)=G=FLUR(I,M,R);

EC20..
CP=E=SUM(I,FCB(I)*BVBY(I))+SUM((I,M,R),FCR(I,M,R)*BVRMZ(I,M,R))+SUM((I,M,R),UCR(I,M,R)*FLUR(I,M,R));

EC21.. SALES=E=SUM(A,BP(A)*TB(A))+SUM((J,I1),SP(J,I1)*TS(J,I1));

EC22.. NP=E=SALES-CRM-CPRO-CTT-CP;

***** EMISIONES DE CO2
ECIACIONES*****

EC23.. CMPCO2=E=SUM((I,M),AT(I,M)*CMP(I,M)*RM(I,M));

EC24.. TMPCO2=E=SUM((I,M,I1),FMM(I,M,I1)*TMP(I,M,I1));

EC25.. TBTCO2=E=SUM((I,A),BA(I,A)*TBT(I,A));

EC26.. TSPCO2=E=SUM((I,J,I1),SM(I,J,I1)*TSP(I,J,I1));

EC27.. PMPCO2=E=SUM((I,M,R),FLUR(I,M,R)*PMP(I,M,R));

EC28.. BTCO2=E=SUM((A),TB(A)*BT(A));

EC29.. SPCO2=E=SUM((J,I1),TS(J,I1)*CSP(J,I1));

EC30.. TOTALCO2=E=TMPCO2+TBTCO2+TSPCO2+PMPCO2+BTCO2+SPCO2-CMPCO2;

MODEL AGRICULTURE /ALL/;

OPTION LIMCOL=0;

OPTION LIMROW=0;

*CONDICIONES*****

SOLVE BIOTURBOSINA PRODUCCION USING MIP MAXIMAZING NP;