



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Modelo regional de producción y transporte de biocombustibles en Colombia**

**Ana María Flórez Berrío**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Escuela de Sistemas  
Medellín, Colombia

2011



# **Modelo regional de producción y transporte de biocombustibles en Colombia**

**Ana María Flórez Berrío**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería de Sistemas**

Director:

Ph.D., Carlos Jaime Franco Cardona

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Escuela de Sistemas  
Medellín, Colombia

2011



## **Agradecimientos**

En primer lugar agradezco a Dios por llenarme de bendiciones durante toda mi vida y mostrarme siempre el camino, permitiéndome en este momento alcanzar una meta que es la suma de mis sueños. A mi familia por su apoyo incondicional y por rodearme siempre del cariño necesario para superar momentos difíciles, dándome la fortaleza necesaria en cada uno de los momentos de mi vida, en especial durante toda esta etapa de preparación para mi desempeño profesional.

A Carlos Jaime Franco C., Ph. D, Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia y Director de Tesis, por su invaluable asesoría y orientación, pero sobre todo por su paciencia, disposición y sus admirables enseñanzas las cuales no se limitaron solo al tema de estudio sino que además hizo infinitos aportes a mi crecimiento como persona.

A Isaac Dyner R., Ph. D, Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, por su orientación y asesoría en las diferentes etapas de este proceso, las cuales representaron una ayuda fundamental en los resultados obtenidos .

A la Universidad Nacional de Colombia que por espacio de siete años se convirtió en mi segundo hogar, de la cual guardo los más bellos recuerdos e inmensos sentimientos de gratitud.

A ISA S.A E.S.P por haber hecho posible la realización del proyecto “Modelo Regional de Producción y Transporte de Biocombustibles en Colombia – Beca ISA” en el cual está enmarcada ésta tesis.

Finalmente agradezco a todos mis amigos y a todas las personas que de una u otra forma me acompañaron durante todo éste proceso y sin los cuales estoy segura no habría sido posible terminarlo con éxito.



## Resumen

Los biocombustibles se han convertido a nivel mundial en una alternativa para hacer frente a la creciente demanda energética. Es por esto que se han creado políticas e incentivos para contribuir al crecimiento de la demanda y la oferta de estos combustibles. Sin embargo, en Colombia, las metas propuestas no se han cumplido y se han tenido que realizar cambios en el programa de mezclas planteado inicialmente por el Estado. En esta tesis se presenta un análisis acerca de estas políticas e incentivos y concluimos que incentivos como la obligatoriedad de la mezcla y la fijación de los precios impactan de manera significativa al sector, y que incentivos como reducciones del IVA y el Impuesto de Renta lo impactan en menor medida.

**Palabras clave:** biocombustibles, dinámica de sistemas, incentivos.

## Abstract

Biofuels have become an alternative for facing the growing energy demand. Thus, policies and incentives have been created in order to contribute to the growing of the supply and demand. However, in Colombia, the proposed goals have not been met yet, and the fuel mixing program initially proposed by the government has suffered adjustments and changes. We show in this work an analysis regarding to policies and incentives, and we conclude that incentives such as mandatory fuel mix and the price fixing, have a significant impact on biofuels production; and that the VAT and income tax incentives have a lower impact on biofuels production.

**Keywords:** Biofuels, system dynamics, incentives.

# Contenido

<b>Resumen.....</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>X</b>
<b>Lista de siglas .....</b>	<b>XI</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Los biocombustibles .....</b>	<b>5</b>
1.1 Etanol .....	7
1.2 Biodiesel .....	9
1.3 Biocombustibles, medio ambiente y el sector alimenticio .....	11
1.3.1 Biocombustibles y medio ambiente .....	11
1.3.2 Biocombustibles y seguridad alimenticia .....	12
1.4 Estudio de la producción de biocombustibles.....	13
1.4.1 Modelos de equilibrio.....	14
1.4.2 Modelos de optimización .....	16
1.4.3 Modelos de simulación .....	17
<b>2. Biocombustibles en Colombia.....</b>	<b>21</b>
2.1 La cadena de suministro de biocombustibles.....	21
2.2 Incentivos a la producción de biocombustibles .....	25
2.3 Problemática actual de los biocombustibles en Colombia .....	26
2.4 Objetivos y alcance del estudio.....	33
2.4.1 Objetivo general .....	33
2.4.2 Objetivos específicos.....	34
2.4.3 Alcance .....	34
<b>3. Dinámica de sistemas para el análisis de la producción de biocombustibles...35</b>	
3.1 Proceso de modelado con dinámica de sistemas.....	37
3.1.1 Identificación del problema .....	38
3.1.2 Formulación de la hipótesis dinámica.....	38
3.1.3 Formulación de un modelo de simulación.....	39
3.1.4 Validación.....	39
3.1.5 Diseño y evaluación de políticas .....	40
<b>4. Modelo regional de producción y transporte de biocombustibles en Colombia41</b>	
4.1 Hipótesis dinámica.....	41
4.2 Diagrama de flujos y niveles .....	47
4.3 Validación .....	58



---

4.3.1 Validación de estructura .....	58
4.3.2 Validación de comportamiento.....	60
<b>5. Resultados.....</b>	<b>67</b>
5.1 Etanol.....	69
5.1.1 Análisis de oferta y demanda nacional.....	69
5.1.2 Análisis de oferta y demanda regional .....	71
5.1.3 Análisis del precio internacional del azúcar.....	74
5.1.4 Análisis de flujos de etanol entre regiones .....	77
5.2 Biodiesel .....	79
5.2.1 Análisis de oferta y demanda nacional.....	79
5.2.2 Análisis de oferta y demanda regional .....	82
5.2.3 Análisis de los flujos de biodiesel entre las regiones.....	84
5.3 Análisis de sensibilidad .....	87
5.3.1 Precio del biocombustible .....	87
5.3.2 Demanda de biocombustible.....	91
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>97</b>
<b>7. Trabajo futuro .....</b>	<b>100</b>
<b>A. Anexo: Resumen de revisión de la literatura .....</b>	<b>101</b>
<b>B. Anexo: Ecuaciones del modelo.....</b>	<b>106</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>118</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Producción mundial de energía .....	5
<b>Figura 2.</b> Consumo mundial de biocombustibles .....	7
<b>Figura 3.</b> Cadena de suministro de biodiesel.....	24
<b>Figura 4.</b> Cadena de Suministro de Etanol .....	25
<b>Figura 5.</b> Producción vs Demanda de Etanol (Según las diferentes resoluciones) .....	28
<b>Figura 6.</b> Producción vs Demanda de Biodiesel (Según las diferentes resoluciones) .....	29
<b>Figura 7.</b> Ajuste de la capacidad de cultivos.....	43
<b>Figura 8.</b> Ajuste de la capacidad de producción .....	44
<b>Figura 9.</b> Diagrama Causal General .....	45
<b>Figura 10.</b> Regiones Seleccionadas .....	46
<b>Figura 11.</b> Modelo regional.....	47
<b>Figura 12.</b> Modelo Regional. Flujos y Niveles.....	48
<b>Figura 13.</b> Inversión en plantas de producción. ....	53
<b>Figura 14.</b> Ajuste de la capacidad de producción. Flujos y Niveles.....	55
<b>Figura 15.</b> Ajuste del cultivo de materias primas. Flujos y niveles .....	56
<b>Figura 16.</b> Capacidad de producción histórica vs. Demanda de Etanol .....	61
<b>Figura 17.</b> Capacidad de producción histórica vs. Demanda de Biodiesel.....	62
<b>Figura 18.</b> Capacidad de producción vs. Demanda nacional. ....	63
<b>Figura 19.</b> Capacidad de producción vs. Demanda nacional. ....	64
<b>Figura 20.</b> Capacidad de producción vs. Demanda nacional. ....	65
<b>Figura 21.</b> Capacidad de producción vs. Demanda nacional. ....	66
<b>Figura 22.</b> Escenarios de evaluación.....	68
<b>Figura 23.</b> Capacidad de producción vs. Demanda de etanol. Escenario base y Escenario 2.....	70
<b>Figura 24.</b> Capacidad de producción vs. Demanda de etanol. Escenario 3 y Escenario 4. ....	71

---

<b>Figura 25.</b> Producción de etanol regional. Porcentaje de mezcla actual .....	73
<b>Figura 26.</b> Producción de Etano regional. Incremento en el porcentaje de mezcla .....	74
<b>Figura 27.</b> Producción vs. Demanda de etanol. Precio internacional del azúcar alto.....	75
<b>Figura 28.</b> Producción Regional vs. Demanda de Etanol. Precio internacional del azúcar alto .....	76
<b>Figura 29.</b> Capacidad de producción vs. Demanda de biodiesel. Escenario base y Escenario 2. ....	81
<b>Figura 30.</b> Capacidad de producción vs. Demanda de biodiesel. Escenario 3 y Escenario 4. ....	82
<b>Figura 31.</b> Producción de Biodiesel regional. Porcentaje de mezcla actual.....	83
<b>Figura 32.</b> Producción de Biodiesel regional. Incremento en el porcentaje de mezcla ...	84
<b>Figura 33.</b> Análisis de sensibilidad. Precio de Etanol.....	88
<b>Figura 34.</b> Análisis de sensibilidad. Precio de etanol - Caso 2 .....	89
<b>Figura 35.</b> Análisis de sensibilidad. Precio de Biodiesel.....	90
<b>Figura 36.</b> Análisis de sensibilidad. Precio de biodiesel- Caso 2.....	91
<b>Figura 37.</b> Análisis de sensibilidad. Demanda de gasolina.....	93
<b>Figura 38.</b> Análisis de sensibilidad. Demanda de gasolina con incremento en el porcentaje de mezcla .....	94
<b>Figura 39.</b> Análisis de sensibilidad. Demanda de diesel. ....	95
<b>Figura 40.</b> Análisis de sensibilidad. Demanda de diesel con incremento en el porcentaje de mezcla.....	96

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Producción de Etanol Mundial (Millones de Galones) .....	8
<b>Tabla 2.</b> Producción de Biodiesel Mundial (Miles de Toneladas) .....	10
<b>Tabla 3.</b> Materias primas para la producción de biocombustibles en Colombia .....	22
<b>Tabla 4.</b> Plantas de producción de etanol actuales.....	22
<b>Tabla 5.</b> Plantas de producción de biodiesel actuales.....	23
<b>Tabla 6.</b> Producción vs. Demanda de Etanol .....	31
<b>Tabla 7.</b> Producción vs. Demanda de Biodiesel.....	31
<b>Tabla 8.</b> Capacidad de cultivos y producción inicial. Etanol .....	49
<b>Tabla 9.</b> Capacidad de cultivos y producción inicial. Biodiesel.....	50
<b>Tabla 10.</b> Costos de producción. ....	51
<b>Tabla 11.</b> Demanda de combustible fósil .....	52
<b>Tabla 12.</b> Inversión vs Rentabilidad .....	54
<b>Tabla 13.</b> Características de la caña de azúcar y la yuca en la producción de etanol.....	72
<b>Tabla 14.</b> Flujos de etanol entre regiones.....	78
<b>Tabla 15.</b> Flujos de etanol entre regiones. Incremento en el porcentaje de mezcla. ....	79
<b>Tabla 16.</b> Flujos de biodiesel entre regiones. Porcentaje de mezcla actual .....	85
<b>Tabla 17.</b> Flujos de biodiesel entre regiones. Incremento en el porcentaje de mezcla. ....	86
<b>Tabla 18.</b> Demanda de combustible fósil. Caso 3- UPME.....	92
<b>Tabla 19.</b> Demanda de combustible fósil. Caso 7 - UPME.....	93

---

## Lista de siglas

**AHP:** Analytic Hierarchy Process.

**B10:** Mezcla del 10% de Biodiesel y el 90% de Diesel.

**E10:** Mezcla del 10% de Etanol y el 90% de Gasolina.

**GHG:** Green House Gases.

**GNV:** Gas Natural Vehicular.

**GTAP:** Global Trade Analysis Project.

**LCA:** Life Cycle Assessment.

**Región 1 – Valle del Cauca:** Integrada por los departamentos: Putumayo, Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Huila, Tolima, Quindío, Caldas, Risaralda.

**Región 2 – Bogotá y Llanos Orientales:** Integrada por los departamentos: Arauca, Casanare, Meta, Vichada, Guainía, Guaviare, Caquetá, Vaupés, Amazonas, Boyacá, Cundinamarca.

**Región 3 - Santanderes:** Integrada por los departamentos: Santander, Norte de Santander

**Región 4 – Costa Atlántica:** Integrada por los departamentos: Córdoba, Sucre, Atlántico, Magdalena, La Guajira, Cesar, Bolívar, San Andrés.

**Región 5 - Antioquia:** Integrada por los departamentos: Antioquia, Chocó.

**RFA:** Renewable Fuels Association.

**SMMLV:** Salario Mínimo Mensual Legal Vigente.

**WAR:** Waste Reduction.

**VGRC:** Valle Geográfico del Río Cauca.



## Introducción

En busca de alternativas que permitan hacer frente a la creciente demanda energética y a los problemas ambientales, los biocombustibles se han convertido en una de las alternativas más prometedoras, por lo menos en la transición a otras alternativas energéticas como el hidrógeno, para hacer frente a los problemas de demanda y medio ambiente. Es por esto que a nivel mundial se han venido desarrollando diferentes políticas que lleven a un mayor uso y producción de los mismos (1; 2; 3).

Colombia en particular es un país que posee las características geográficas y climáticas necesarias para la producción de biocombustibles: vastas extensiones de tierra disponibles para cultivar materias primas, mano de obra a precios razonables y las condiciones agroclimáticas adecuadas para el desarrollo de una amplia variedad de cultivos utilizados como materias primas, hacen que Colombia se convierta en uno de los países con gran potencial para la producción de biocombustibles (4; 5; 6). Por lo tanto, con el fin de explotar este potencial y sacar provecho a los beneficios económicos y sociales que la producción de biocombustibles podría traerle al país, como una mayor independencia energética de otros países y la generación de empleo (7; 8), a partir del 2001 con la Ley 693 (9) el gobierno decide desarrollar un programa de biocombustibles en el que se dictan normas acerca de su uso y se plantean políticas en cuanto al consumo y la producción de etanol y biodiesel en Colombia.

En consecuencia, el estado ha venido creando una serie de incentivos para los cultivos relacionados con la producción de biocombustibles y para la inversión en plantas de producción, con el fin de incrementar la oferta de etanol y de biodiesel, y lograr cumplir con la demanda impuesta. Pero a pesar de las políticas e incentivos que se vienen implementando en el país, las metas propuestas no se han cumplido de la manera en que el gobierno se las había planteado y se ha tenido que ir haciendo cambios en el programa de mezclas de los biocombustibles con los combustibles fósiles.

Estos cambios en el programa, además de la incertidumbre de que en un futuro pueda lograrse una producción suficiente como para satisfacer la demanda de biocombustibles según las expectativas del gobierno, que se reflejan en otras políticas como la entrada de vehículos flex-fuel al país a partir del 2012 (10; 11), generan la necesidad de estudiar el comportamiento de la cadena de suministro de los biocombustibles en Colombia y evaluar las políticas e incentivos que se están dando actualmente a algunas de sus partes. Por otra parte, tomando en cuenta que la producción de biocombustibles en Colombia está concentrada en unas pocas regiones del país, es importante analizar la localización de las plantas de producción y el transporte de los biocombustibles a las diferentes regiones, además de la factibilidad del uso de otras materias primas y otras regiones para el cultivo que puedan llevar a un incremento de la producción y finalmente a la satisfacción de la demanda interna impuesta.

Con el fin de analizar ésta problemática del programa de producción de biocombustibles en Colombia, se desarrolla este trabajo en el cual por medio de un modelo regional de dinámica de sistemas se evalúa la estructura y el comportamiento de la cadena de suministro, y bajo diferentes escenarios se busca analizar si el programa de biocombustibles en Colombia planteado por el gobierno se está cumpliendo y si las políticas actuales van en el camino correcto para el cumplimiento de las metas propuestas.

En el capítulo dos se hace una contextualización en cuanto a la producción de biocombustibles a nivel mundial, las características principales de los dos biocombustibles más producidos a nivel mundial (Etanol y Biodiesel) y las opiniones generadas acerca de las ventajas y desventajas que pueden traer este tipo de alternativas energéticas. Finalmente se hace un recorrido por el estado del arte en el estudio de la cadena de suministro de biocombustibles y las políticas creadas por los gobiernos para incrementar su oferta.

En el capítulo tres se describe la situación actual de la cadena de suministro de biocombustibles en Colombia, considerando el programa de producción que se viene implementando ya hace algunos años. A continuación se plantea la problemática actual de la producción de biocombustibles en el país y las políticas que se están llevando a



---

cabo para incentivar la inversión en el sector. Finalmente se plantean los objetivos y la justificación de este trabajo.

Luego de conocer el problema que se debe abordar, se plantea en el capítulo cuatro que la dinámica de sistemas puede ser la metodología a utilizar para analizarlo de manera correcta y se presentan las etapas en las que se debe basar esta metodología para que se pueda confiar en los resultados obtenidos a partir de ella.

Después de definir la metodología, en el capítulo cinco se detalla el modelo desarrollado, pasando por la hipótesis dinámica, el diagrama de flujos y niveles y finalmente la validación del modelo. Así se presentan las partes más importantes del proceso de modelado que se realizó y se validan los supuestos y la información que fueron utilizados en éste.

Conociendo el modelo desarrollado, se pasa al análisis de resultados en el capítulo seis. En este se presentan diferentes escenarios que permiten evaluar la situación actual del mercado, y además analizar posibles estados futuros y el comportamiento del sistema ante estos cambios. Se realiza además un análisis de sensibilidad que permite ver que tan sensible puede ser el modelo ante cambios en ciertos parámetros, además de evaluar si esto puede ocurrir realmente en el sistema.

Finalmente en el capítulo siete se presentan las conclusiones acerca de la producción de biocombustibles en Colombia, los impactos de las políticas actuales y la importancia del planteamiento adecuado de las políticas para poder alcanzar las metas propuestas. En el capítulo 8 se plantea el trabajo futuro dado el alcance propuesto y las limitaciones encontradas al momento de desarrollar este trabajo



# 1. Los biocombustibles

El calentamiento global y la insuficiencia a largo plazo de las reservas de petróleo para cubrir la creciente demanda energética han despertado un gran interés a nivel mundial por desarrollar nuevas alternativas de energía que sean más limpias, eficientes y que finalmente permitan hacer frente a los problemas de demanda y de medio ambiente que se presentan (12; 13; 14). Estas alternativas se conocen como energías renovables y para el 2008 representaban el 10% de la producción mundial de energía (Figura 1).

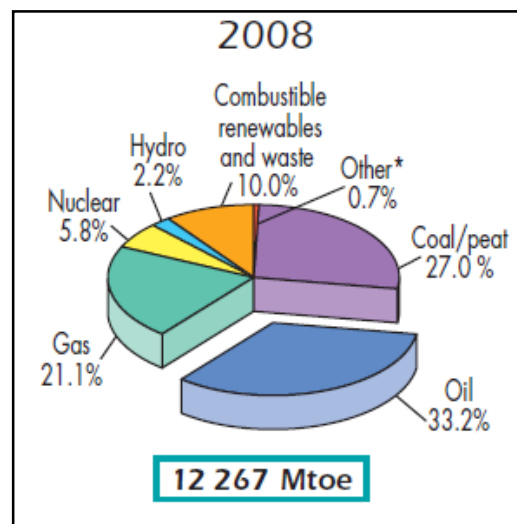


Figura 1. Producción mundial de energía (15)

Dentro de las energías renovables se encuentran la biomasa, celdas fotovoltaicas, energía eólica, geotérmica y la hidroelectricidad. Una de las fuentes de energía renovable primaria más importante para las siguientes décadas es la biomasa debido a que ésta puede ser sustituto de cualquier tipo de combustible fósil si se utilizan diferentes tipos de tecnologías para convertirla en calor, electricidad o combustibles líquidos. La biomasa puede clasificarse tanto en tradicional, que es la utilizada directamente para el calor y la cocción como la leña, los residuos agrícolas y desechos animales, como en la biomasa

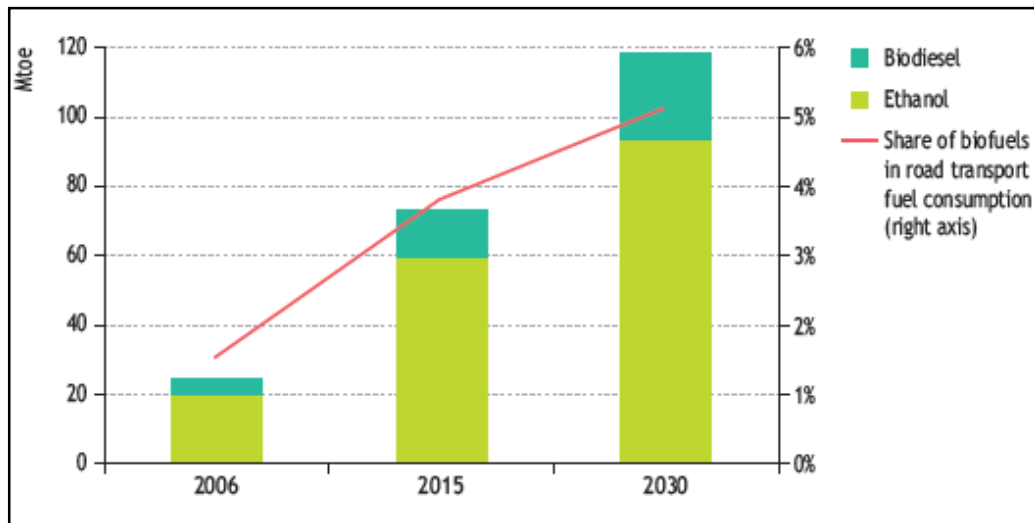
moderna que luego de transformaciones puede utilizarse como electricidad, calor, y combustible líquido (biocombustibles) (16).

Los biocombustibles son combustibles generados a partir de productos agrícolas y desechos orgánicos (17). Su clasificación puede hacerse según los niveles de desarrollo tecnológico y pueden definirse como de primera, segunda y tercera generación.

- Los biocombustibles de primera generación son aquellos producidos a partir de materias primas que son utilizadas también como alimentos y para los que se utiliza tecnología convencional (18). Debido a la competencia que estos generan con el sector alimenticio son considerados como una alternativa energética de transición (19).
- Los de segunda generación son los producidos a partir de fuentes que no interfieran con la seguridad alimenticia como residuos agrícolas y desechos de madera (20).
- Los biocombustibles de tercera generación son cultivos genéticamente modificados para capturar más CO<sub>2</sub> de la atmósfera de manera que resulte un combustible de carbono neutral (21).

Las tecnologías de segunda y tercera generación están todavía en desarrollo y por lo tanto la producción está representada por los biocombustibles de primera generación.

Actualmente la producción de biocombustibles en el mundo está dada principalmente por el etanol y el biodiesel, representando el primero un mayor porcentaje que el segundo. Estos son utilizados en su mayoría en el sector transporte y aunque actualmente no representan un alto porcentaje de la demanda de combustibles líquidos se espera que para los años siguientes se experimente un incremento en dicho porcentaje (Figura 2).



**Figura 2.** Consumo mundial de biocombustibles (16)

Los capítulos son las principales divisiones del documento. En estos, se desarrolla el tema del documento. Cada capítulo debe corresponder a uno de los temas o aspectos tratados en el documento y por tanto debe llevar un título que indique el contenido del capítulo.

## 1.1 Etanol

El etanol es el alcohol etílico producido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en productos vegetales combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa (22). Entre las materias primas más utilizadas para la producción de etanol de primera generación se encuentran la caña de azúcar, el maíz, la yuca y la remolacha. Sin embargo, se han estado realizando investigaciones sobre el etanol de segunda generación con el fin de encontrar procesos que permitan producirlo a partir de desechos orgánicos ricos en celulosa, eliminando el costo de la materia prima y dándole un uso efectivo a los desechos, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria.

Los subproductos obtenidos de la producción de etanol dependen de la materia prima utilizada. De la producción de etanol a partir de caña de azúcar se obtiene el bagazo que puede ser utilizado como fuente de energía durante el proceso o para otras aplicaciones energéticas (23), y la vinaza, en una proporción de 13:1, que puede ser utilizada como abono orgánico en cultivos de todo tipo (24). De la producción de etanol a

partir de granos, como el maíz, el subproducto obtenido son los granos de destilería que son utilizados como alimento para animales (25).

En 2009 la producción de etanol fue de aproximadamente 20.000 millones de galones de los cuales 10.600 millones fueron producidos en Estados Unidos, ubicándolo como el mayor productor de etanol en el mundo (26) y cuya producción se realiza en su mayoría a partir de maíz (27). Según la RFA (Renewable Fuels Association - Tabla 1) el segundo mayor productor a nivel mundial es Brasil y su producción es a partir de caña de azúcar. En cuanto al consumo, Estados Unidos es el mayor consumidor de etanol (28) por lo que requiere de importaciones de otros países productores como Brasil, considerado el mayor exportador de etanol (29).

**Tabla 1.** Producción de Etanol Mundial (Millones de Galones) (26)

	Brasil	Canadá	Colombia	China	India	Tailandia	Australia	EU	Otros
2009	6577.89	290.59	83.21	541.55	91.67	435.20	56.80	1039.52	247.27

Aunque el uso de etanol ha tomado una gran fuerza durante los últimos años, se han encontrado algunos problemas en cuanto a su transporte y los cambios que deben realizarse al motor de los vehículos cuando el biocombustible vaya a ser utilizado en altas proporciones con los combustibles fósiles.

Debido a la alta volatilidad y absorción de agua que presenta el etanol se requiere de condiciones especiales para poder transportarlo, de manera que pueda asegurarse tanto la calidad del producto como la de las mezclas que se realizan con éste (25). Además, para poder realizar estas mezclas con los combustibles fósiles es necesario realizar un proceso de deshidratación y destilación de manera que se eviten daños en el motor.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que el etanol puede ser utilizado en cualquier motor hasta en un 10% de la mezcla sin tener que hacer modificaciones en éste (27) ya que de realizar mezclas mayores a ésta se pueden ocasionar daños al vehículo. Debido a esta limitación en el uso de grandes porcentajes de etanol en los motores convencionales, durante los últimos años se han venido produciendo vehículos flex-fuel, los cuales pueden funcionar adecuadamente con gasolina, con mezclas de gasolina y etanol en diferentes proporciones, y con sólo etanol. Un ejemplo claro de esto

se presenta en Brasil donde aproximadamente el 90% de los vehículos nuevos son flex-fuel (29) llevando al continuo crecimiento en la oferta y la demanda del etanol en este país. En el caso de Colombia aunque los vehículos flex-fuel aún no son comunes, a partir del 1° de enero del 2012 se exigirá que el parque automotor nuevo tenga motores flex-fuel (E85), es decir, que puedan funcionar normalmente con gasolina o con mezclas de hasta el 85% de etanol (10).

## 1.2 Biodiesel

El biodiesel se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales, metanol y un catalizador en una proporción aproximada del 87%, 12% y 1% respectivamente (30). Entre las materias primas más utilizadas para su producción se encuentran los aceites de soya, palma africana, higuera, jatropha y colza, debido a su disponibilidad, rendimiento y a la calidad del combustible obtenido. Se utilizan también para su producción aceites usados que hacen que el costo de la materia prima sea más bajo, además de que se le da utilidad a productos que en otro caso serían un residuo ayudando a disminuir la contaminación.

Por otra parte, se están desarrollando estudios en plantas piloto donde se evalúa la producción de biodiesel a partir de algas. Estas algas tienen grandes beneficios en cuanto a su rendimiento que puede ser entre 10 y 50 veces superior al de otras materias primas (31), además que su productividad no depende de la fertilidad del suelo, lo que permitiría en teoría tanto incrementar la producción de biodiesel sin competir por las tierras con el sector alimenticio como producirlo en una mayor cantidad de regiones (32). Sin embargo, aún no se han superado algunos problemas en cuanto a la sostenibilidad, la tecnología necesaria y los costos de estos cultivos (33; 34). Para un adecuado desarrollo de ésta alternativa se requiere que los cultivos estén bajo un rango de temperatura, una cantidad de CO<sub>2</sub> y nutrientes dados (32). Además, se requiere de grandes cantidades de agua lo que llevaría nuevamente a una competencia con el sector alimenticio por este recurso; aunque hay autores que recomiendan que se utilicen aguas residuales industriales y se haga el cultivo en áreas no aptas para alimentos de manera que pueda eliminarse dicha competencia (35).

Las características del biodiesel son similares a las del diesel bajo en azufre en términos de potencia y torque, sin necesidad de realizar grandes cambios en el motor de los

vehículos. Incluso, el biodiesel contribuye a alargar la vida del motor debido a su poder lubricante, y desde el punto de vista de la inflamabilidad y toxicidad es mucho más seguro, es biodegradable y tiene menor impacto ambiental. Aun así, al igual que el etanol, el biodiesel puede utilizarse en motores convencionales hasta cierto porcentaje de mezcla. Según estudios recientes, si se utiliza una mezcla hasta con el 10% de biodiesel (B10) no se producen impactos negativos en el funcionamiento del motor (36).

Con respecto a la obtención de subproductos, a partir de la producción de biodiesel se obtiene la glicerina que representa aproximadamente el 9% de esta producción (30), y que luego de ser refinada puede utilizarse en la industria química, cosmética, farmacéutica, entre otras (37). No obstante, la cantidad de glicerina obtenida de la producción de biodiesel puede convertirse más en un problema que una ventaja, como es el caso de Colombia en donde la producción es mucho mayor que el mercado nacional y por lo tanto su comercialización no está garantizada (38; 39).

En cuanto a los países productores de biodiesel, la Unión Europea es el mayor productor de biodiesel, liderado por Alemania, Francia, España e Italia, donde la mayor parte de la producción se realiza a partir de aceite colza (40; 41). El segundo mayor productor es Estados Unidos, seguido por Brasil y Argentina, los cuales producen el biodiesel en su mayoría a partir de aceite de soya (42; 43; 44).

**Tabla 2.** Producción de Biodiesel Mundial (Miles de Toneladas)

	Alemania <sup>1</sup>	Francia <sup>1</sup>	España <sup>1</sup>	Italia <sup>1</sup>	Estados Unidos <sup>2</sup>	Brasil <sup>3</sup>	Argentina <sup>4</sup>	Colombia <sup>5</sup>
<b>2009</b>	2539	1959	859	737	1915	1500	1150	516

<sup>1</sup> (132)

<sup>2</sup> (42)

<sup>3</sup> (44)

<sup>4</sup> (43)

<sup>5</sup> (83)



## **1.3 Biocombustibles, medio ambiente y el sector alimenticio**

En busca de alternativas energéticas que permitan hacer frente a la creciente demanda y a los problemas ambientales, los biocombustibles se han convertido en una de las alternativas más incentivadas por los diferentes países. Aun así, estos combustibles han abierto un debate en cuanto a su sostenibilidad y viabilidad ambiental y económica

### **1.3.1 Biocombustibles y medio ambiente**

Una de las mayores preocupaciones a nivel mundial es el medio ambiente y el cambio climático que se está dando debido a la emisión de gases de efecto invernadero (Green House Gases - GHG). En el 2008, alrededor del 37% de las emisiones de GHG eran ocasionadas por la combustión de petróleo y el 22% de las emisiones eran causadas en el sector transporte (45). De ahí que parte de la solución al problema del calentamiento global debido a la emisión de GHG se concentró en el desarrollo de alternativas energéticas más limpias que sustituyeran el uso de los combustibles fósiles en el sector transporte.

Hay autores que aseguran que los biocombustibles son una buena alternativa energética en miras de la conservación del medio ambiente, considerando que las emisiones de dióxido de carbono disminuyen con el uso de estos combustibles (46; 47; 48; 49) y que la cantidad de cultivos que deben hacerse para obtener la materia prima puede mejorar la calidad del aire. Además de que los biocombustibles pueden ser biodegradados hasta en un 85% en 28 días, algo que no ocurre con los combustibles fósiles que pueden tardar años en degradarse (50).

Sin embargo hay autores que sostienen que la producción de biocombustibles, en ocasiones, necesitan casi el mismo combustible fósil para ser producido que el que reemplazan (51). Además de que temen que las selvas puedan ser reemplazadas por plantaciones de materias primas necesarias para la elaboración de biocombustibles (52; 53), cultivos que ayudan mucho menos al control de GHG. Por otro lado autores aseguran que problemas ambientales como la erosión del suelo, la contaminación causada por el uso de fertilizantes y pesticidas, y el uso de grandes cantidades de agua,

se deben a la producción de biocombustibles. Argumentan además que la selección de cultivos adecuados o la producción de biocombustibles de segunda y tercera generación puede reducir el impacto ambiental causado, ya que es posible disminuir el uso de agua, fertilizantes y la polución relacionadas al proceso de producción (54; 55). De la cuarta subdivisión en adelante, cada nueva división o ítem puede ser señalada con viñetas, conservando el mismo estilo de ésta, a lo largo de todo el documento.

### **1.3.2 Biocombustibles y seguridad alimenticia**

Parte de la importancia que se le ha dado a los biocombustibles radica en que son producidos a partir de materias primas renovables y por lo tanto no existe el peligro de que se agoten las fuentes, tal y como ocurre actualmente con los combustibles fósiles. Aun así hay autores que temen porque la seguridad alimenticia se está viendo afectada por la creciente producción de biocombustibles.

Por un lado hay quienes sostienen que la escasez y los altos precios de los alimentos, que también son utilizados como materias primas para la producción de biocombustibles, se deben a la gran demanda de estos tanto para la alimentación como para la agroenergía y a la competencia inminente entre estos dos sectores (51; 56; 57; 58), y que por lo tanto, la única manera de poder aprovechar los biocombustibles sin perjudicar el sector alimenticio, sería utilizando biocombustibles de segunda y tercera generación que no requieran de materias primas que también sean necesarias como alimentos (59; 54).

Aun así, hay autores que argumentan que aunque el incremento en los precios de los cultivos utilizados como alimentos y materia prima para la producción de biocombustibles puede deberse a la gran demanda de estos para energía y alimentación, hay otros factores que deben ser tomados en cuenta como el precio del petróleo y las especulaciones en el sector energético (55).

Por otro lado hay autores que recomiendan al momento de analizar los efectos de la producción de biocombustibles sobre el sector alimenticio tomar en cuenta los subproductos obtenidos durante el proceso de producción de biocombustibles, ya que estos subproductos pueden ser utilizados como alimento para animales y por lo tanto no sería necesario utilizar la misma cantidad de tierras para su cultivo reduciéndose las consecuencias en el uso de la tierra causadas por la producción de biocombustibles (60; 61).

Aunque aún no se ha dicho la última palabra acerca de las ventajas y desventajas que trae la utilización de los biocombustibles, estos parecen ser una buena solución, por lo menos parcial, a los problemas ambientales y de demanda de combustibles a nivel mundial, y por lo tanto países como Brasil, Estados Unidos, Argentina, Colombia, la Unión Europea, entre otros, están incentivando la producción de biocombustibles como el Etanol y el Biodiesel (62; 2; 3).

Así, además del estudio de las consecuencias a nivel ambiental y en el sector alimenticio de la utilización de los biocombustibles, a partir del interés a nivel mundial por incrementar su producción y crear las políticas suficientes para incentivar la inversión en el sector, se han realizado gran cantidad de estudios acerca de la cadena de suministro de biocombustibles en los que se analiza el comportamiento del mercado actual y futuro, además de evaluar si las políticas actualmente implementadas por los gobiernos son las adecuadas para alcanzar las metas que ellos mismos han establecido en relación a su uso.

## **1.4 Estudio de la producción de biocombustibles**

En medio del interés a nivel mundial por incrementar la oferta de nuevas alternativas energéticas, en especial aquellas que sean más amigables con el medio ambiente como lo son los biocombustibles, y del desarrollo de políticas por parte de diferentes países para alcanzar una producción significativa que les permita cierto grado de independencia energética de otros países y que a su vez les traiga beneficios sociales y ambientales; en la comunidad científica se han venido desarrollando estudios acerca de la factibilidad técnica, económica y ambiental de la producción de biocombustibles en cada uno de los países y se ha analizado que tan efectivas son las políticas y los subsidios dados a los inversionistas para lograr incrementar la oferta.

Cada uno de los estudios realizados tiene unos objetivos diferentes planteados y para alcanzarlos utilizan diferentes metodologías que se ajusten más a las necesidades, sin embargo la gran mayoría están encaminados a conocer el comportamiento del sector de los biocombustibles actual y futuro según las políticas adoptadas en cada región de estudio.

En este caso, la revisión de la literatura realizada acerca de la producción de biocombustible, se centró en modelos de investigación de operaciones y se dividieron en tres grupos según las metodologías utilizadas por los autores: Modelos de equilibrio, optimización y simulación. A continuación se analizan algunos de los modelos encontrados para cada una de estas metodologías

### **1.4.1 Modelos de equilibrio**

Algunos autores realizan un análisis económico de la cadena de suministro de biocombustibles a partir del cual obtienen la oferta y demanda de biocombustibles, los costos asociados a la producción, y los incentivos que el gobierno debe dar para garantizar la producción necesaria para atender la demanda. Para este análisis se han utilizado herramientas como los modelos de equilibrio parcial y modelos de equilibrio general computable.

A partir de modelos de equilibrio parcial, autores como Sourie y Rozakis (2001; 2005), Freire, Malça y Rozakis (2004), Bernard y Prieur (2007) han realizado un análisis económico de la cadena de suministro de biocombustibles en uno de los principales países productores de biodiesel a nivel mundial, Francia.

Sourie y Rozakis (2001) (63) realizan un análisis micro y macroeconómico de la cadena de suministro, tanto para el etanol como para el biodiesel, a partir del cual determinan la oferta óptima de cultivos, el costo de oportunidad de los biocombustibles, los costos industriales, la demanda de biocombustibles y subproductos, y la exención de impuestos óptima para la cadena según diferentes escenarios del mercado. Los autores llegan a la conclusión de que es más rentable utilizar los cultivos para la producción de biocombustibles que venderlos como alimentos, siempre y cuando el gobierno siga dando subsidios para la producción de biocombustibles. Para el 2005 (64), los mismos autores extienden el análisis de la cadena de suministro de biocombustibles a un ambiente de incertidumbre en el que los niveles de incentivos dados por el gobierno son una función del precio del petróleo y del precio de las materias primas, además de hacer un análisis la contribución del biocombustible a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero. En este caso concluyen que los incentivos podían ser más bajos sin representar un riesgo significativo en la viabilidad del sistema.

Freire, Malça y Rozakis (2004) (65) además de utilizar un modelo de equilibrio parcial para realizar el análisis micro y macro-económico de la cadena de suministro y determinar los niveles de producción de biocombustibles bajo diferentes escenarios de incentivos dados por el gobierno, utilizan un LCA (Life Cycle Assessment) para encontrar el impacto ambiental que se puede generar a lo largo de la cadena. En el 2007 Bernard & Prieur (66), hacen una aproximación parecida al programa de biocombustibles en Francia. Utilizan un modelo de equilibrio parcial para determinar los factores técnico-económicos, luego bajo diferentes escenarios estudian los subsidios necesarios para alcanzar una producción de biocombustibles que le permita al gobierno alcanzar las mezclas deseadas y finalmente, a partir de un modelo LCA, evalúan los impactos ambientales de dicha producción. Los autores llegan a la conclusión de que las disputas por tierras para alimentos y biocombustibles serán cada vez mayores debido a la escasez de tierras en el país, aun así el uso de biocombustibles puede llevar a la reducción de GHG.

Otros autores evalúan los impactos económicos y ambientales de la producción de biocombustibles por medio de un modelo de equilibrio general computable. Para esto Taheripour, Birur, Hertel y Tyner (2008), Hellmann y Verburg (2008), Taheripour, Hertel, y otros (2010) utilizan un modelo GTAP (Global Trade Analysis Project). GTAP es una base de datos mundial que describe los patrones de comercio bilateral, producción, consumo y usos intermedios de commodities y servicios (67).

Para el 2008 Taheripour, Birur, Hertel y Tyner introducen al GTAP (Global Trade Analysis Project) (61) el sector de los biocombustibles (GTAP-BIO). El GTAP- BIO es un modelo de equilibrio general computable para evaluar el impacto económico y ambiental de la producción de biocombustibles. Para el mismo año Hellmann y Verburg (68) realizan un modelo espacial para determinar la localización del cultivo de materias primas y de las plantas de producción en Europa. Para esto utilizan también un modelo GTAP con el cual calculan los cambios en el uso de la tierra y cuyo objetivo es maximizar las utilidades de cada industria en cada región, este modelo está acompañado de un modelo que calcula el impacto de los cambios en los usos del suelo (Modelo IMAGE) y un modelo que simula dinámicamente la competencia entre los diferentes usos que se le asignan a las tierras (Modelo Dyna-CLUE).

En el 2010 Taheripour, Hertel, y otros (69) agregan a su análisis inicial la evaluación de los subproductos obtenidos durante la producción de biocombustibles. Los autores aseguran que incluir estos subproductos en el análisis es importante ya que al momento de incrementar la producción de biocombustibles, incrementa por ende la producción de los subproductos, haciendo que su precio pueda caer debido a la sobreoferta y llevando a una reducción en las ganancias de los productores de biocombustibles y a un freno en el crecimiento de la industria de los biocombustibles.

### **1.4.2 Modelos de optimización**

En el análisis de la cadena de suministro de biocombustibles, hay autores que se han centrado en modelos matemáticos, los cuales, a partir del cumplimiento de los objetivos en la cada uno de los eslabones de la cadena, permitan ver el estado actual y futuro de la producción de biocombustibles además de planificar la localización de los cultivos de materias primas y la producción de una manera óptima.

Bard, Plummer y Sourie (2000) (70), por ejemplo, desarrollan un modelo de programación matemática a partir del cual analizan la interacción entre el gobierno de Francia, los agricultores y los refinadores, tomando en cuenta que se debe cumplir al máximo el objetivo en cada uno de los niveles, que en el caso del gobierno es el de minimizar los subsidios dados a los otros dos actores y en el caso de los agricultores y refinadores es maximizar sus ganancias. Según los resultados obtenidos por los autores, los subsidios dados por el gobierno tienen que ser muy altos para que la producción de etanol crezca lo suficiente.

Paternina, Cantillo y Jaller (2008) (71) realizan también un modelo de programación matemática en el que analizan la cadena de suministro de etanol en Colombia a partir de caña de azúcar y yuca, y a partir del cual se hace una planificación de la producción de biocombustibles y la localización óptima de las plantas de producción en el país teniendo como función objetivo la minimización de los costos a lo largo de la cadena. Se llega a la conclusión de la materia prima que debe ser utilizada para la producción de biocombustibles en Colombia es la caña de azúcar y que el precio de la yuca debe disminuir significativamente para comenzar a ser una materia prima atractiva para la producción de etanol.

En cuanto a la programación lineal, hay autores que utilizan para el análisis de la cadena de suministro de biocombustibles un modelo de transporte. Wakeley, Hendrickson, Griffin y Matthews (2009) (72) desarrollan un modelo para el análisis del problema del transporte de biocombustibles en Estados Unidos y los efectos que tiene éste sobre la economía y el medio ambiente en el país. En este caso los autores toman en cuenta tanto el transporte de las materias primas como del biocombustible entre las regiones. Según los resultados encontrados, al minimizar el total de los costos son muchos los estados que reciben solo una porción de la demanda de etanol y otros que no reciben nada.

Por otro lado, Lensink y Londo (2010) (73) analizan el problema del transporte entre los países de la Unión Europea. En este caso se evalúan las políticas actuales de biocombustibles y como éstas pueden limitar la introducción de los biocombustibles de segunda generación y afectar los futuros porcentajes de mezcla, y llegan a la conclusión que la entrada de los biocombustibles de segunda generación dependen de la oportunidad creada por los altos precios de la materia prima y del porcentaje de mezcla establecidos por el gobierno.

Leduc, Natarajan, Dotzauer, McCallum y Obersteiner (2009) (74) utilizan un modelo de programación lineal entera mixta para determinar el número, tamaño y ubicación geográfica óptima de plantas de producción de biodiesel a base de jatropha en India minimizando los costos a lo largo de la cadena de suministro. Según los resultados encontrados las plantas están principalmente en el centro del país donde está concentrada la producción de jatropha y el costo que más influencia tiene sobre los resultados es el costo de la materia prima.

### **1.4.3 Modelos de simulación**

Otra de las metodologías utilizadas para el análisis de la cadena de suministro de biocombustibles es la simulación, que a diferencia de las metodologías vistas anteriormente más que encontrar una solución optima busca evaluar el comportamiento y la tendencia del mercado bajo diferentes políticas y escenarios.

Dentro de los estudios realizados se encuentra Escalera, Lee, Parsons y Rusangiza (2008) (75) que proponen un modelo de simulación para el análisis del sistema de producción de biocombustibles en Estados Unidos y de la factibilidad de proyectos que puedan ayudar a la independencia energética y a la reducción de impactos negativos en sistemas externos, como el ambiental y el alimenticio. Bajo la evaluación de diferentes escenarios los autores concluyen que el biodiesel posee una mayor eficiencia energética que el etanol, y que los biocombustibles si pueden ayudar a la reducción de las emisiones de GHG. Quintero, Montoya, Sánchez, Giraldo y Cardona (2008) (76) además de utilizar un modelo de simulación para el estudio de las cadenas de producción de etanol a partir de caña de azúcar y maíz en Colombia, utilizan un modelo WAR (Waste Reduction) para evaluar el impacto ambiental de las cadenas y un modelo AHP (Analytic Hierarchy Process) con el cual evalúan cual es la mejor alternativa según los objetivos económicos y ambientales. Los autores concluyen que el etanol a partir de caña de azúcar es una mejor opción en Colombia tanto a nivel económico como ambiental.

Por otro lado Bunn, McKenzie y Soylu (2008) (77) presentan un modelo de simulación basada en agentes para el análisis de la dinámica de la cadena de suministro de biodiesel a partir de jatropha, en el cual los agentes son los agricultores y las plantas de producción. Con los resultados obtenidos los autores sugieren que el mayor problema de la dinámica de la cadena está en el tiempo que lleva la construcción de nuevas plantas, debido a la escasez recursos de los agricultores y la actitud que se tiene frente al riesgo. Además, hay autores como Bantz y Deaton (2006), Bush, Duffy, Sandor y Peterson (2008), Torres y Arango (2008) y Franco, Flórez y Ochoa (2008) que realizan un análisis de la cadena de suministro de biocombustibles a partir de un modelo de dinámica de sistemas, con el cual evalúan el comportamiento del sistema a través de diferentes políticas y escenarios.

Bantz y Deaton (2006) (78) y Bush, Duffy, Sandor y Peterson (2008) (79) proponen un modelo de Dinámica de Sistemas para comprender el crecimiento de la industria del Biodiesel en Estados Unidos. Para el primer estudio los autores proponen un modelo dividido en dos secciones importantes, la primera recoge todo lo que tiene que ver con la capacidad de producción de biodiesel y la segunda con el cultivo de materias primas, y bajo diferentes escenarios se observa el comportamiento que puede tener la producción de biodiesel. Para el segundo estudio los autores plantean 7 módulos, 6 de los cuales



pertencen a las partes de la cadena de suministro de biocombustibles y uno a la industria del petróleo. A partir de la evaluación de diferentes escenarios se observa el crecimiento que tiene la producción de etanol y finalmente los autores concluyen que para obtener un mayor crecimiento en la producción de etanol, el gobierno debe reducir el riesgo de la inversión y los costos de operación iniciales.

Entre los trabajos sobre biocombustibles desarrollados en la Universidad Nacional de Colombia se encuentra el desarrollado por Torres y Arango (2008) (80) en el que se evalúan los efectos colaterales que pueden presentarse en los mercados derivados de la caña de azúcar en Colombia debido a las políticas que actualmente se están dando en el país con respecto a la producción de etanol a partir de caña de azúcar. Para este análisis se realiza un modelo de dinámica de sistemas y a partir de este se obtienen resultados que llevan a la conclusión de que aunque inicialmente se presentan cambios de gran importancia en la producción y las ventas de azúcar, luego de un periodo de tiempo logran estabilizarse.

Además de este estudio, Franco, Flórez y Ochoa (2008) (81) proponen un modelo de dinámica de sistemas en el que se simulan dos partes de la cadena de suministro de biocombustibles en Colombia: el cultivo de materias primas y la producción. A partir de este modelo se hace un análisis de las políticas e incentivos que actualmente tienen el gobierno Colombiano para la producción de biocombustibles. Los resultados obtenidos muestran que con las políticas actuales la producción de biocombustibles no alcanza para satisfacer la demanda, según los porcentajes de mezclas impuestos por el gobierno. Además los resultados sugieren que el mayor problema se presenta en la capacidad de producción, debido a que los incentivos no alcanzan para proporcionar una rentabilidad lo suficientemente alta como para hacer atractiva la inversión.

Cada uno de los modelos analizados anteriormente para las tres metodologías seleccionadas, posee una serie de fortalezas que permiten hacer una evaluación de la cadena de suministro de biocombustibles y llegar a una solución según los objetivos planteados y los resultados descritos anteriormente, pero por otro lado pueden tener algunas debilidades. Por ejemplo, en algunos casos no son tomados en cuenta los incentivos que los gobiernos están dando a la producción de biocombustibles, lo que

puede llevar a un incremento en la oferta que no está siendo considerado. En otros casos se han realizado modelos que no incluyen partes importantes de la cadena de suministro como lo son la distribución y el transporte de los biocombustibles, con lo que se dejan de lado algunas restricciones importantes en cuanto a medios de transporte y vías disponibles para su distribución, además de los costos en los que se incurre. Por otro lado, en algunos casos se ha considerado la producción y consumo de biocombustibles a nivel nacional, sin tomar en cuenta que puede haber varias regiones con un consumo y producción dada, y que entre ellas deben existir flujos del combustible para llegar a tener un balance en la oferta y demanda nacional. En el Anexo 1 se muestra una tabla en la que se resume la revisión de la literatura descrita anteriormente.

Esta tesis se centra en el estudio de la cadena de suministro de biocombustibles en Colombia y el análisis de las políticas actuales creadas por el gobierno para incrementar la producción de manera que se cumpla con los porcentajes de mezcla que ellos mismos han fijado. Esto tomando en cuenta las materias primas más utilizadas en el país para la producción de etanol y biodiesel, y además diferentes regiones según los centros de producción y consumo más representativos del país.

## **2. Biocombustibles en Colombia**

Colombia en particular es un país que posee las características geográficas y climáticas necesarias para la producción de biocombustibles, las vastas extensiones de tierra disponibles para cultivar materias primas, la mano de obra a precios razonables y las condiciones agroclimáticas adecuadas para el desarrollo de una amplia variedad de cultivos utilizados como materias primas hacen que Colombia se convierta en uno de los países con gran potencial para la producción de biocombustibles (4; 5; 6). Además de que debe considerarse que dicha producción podría traerle beneficios económicos y sociales, como una mayor independencia energética de otros países y la generación de empleo (7; 8).

### **2.1 La cadena de suministro de biocombustibles**

La cadena de suministro de biocombustibles comienza con el cultivo de las materias primas a partir de las cuales se obtienen el etanol y el biodiesel. Como se mencionó anteriormente, para la producción de etanol las materias primas más utilizadas son la caña de azúcar, la yuca, el maíz, la remolacha y el sorgo dulce; y para el caso del biodiesel las más utilizadas son la palma africana, la higuera, la jatropha, la soya y la colza.

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en Colombia, las materias primas más significativas y las regiones más aptas para el cultivo de las mismas son las siguientes (50):