

**BASES CONCEPTUALES PARA LA ESTIMACION DE LAS PROPIEDADES DE LOS BIOCOMBUSTIBLES  
Y SUS MEZCLAS**

**Ing. Lesly Patricia Tejeda Benítez**

**Universidad Tecnológica de Bolívar  
Maestría en Ingeniería – Énfasis en Mecánica  
Cartagena de Indias  
Noviembre - 2011**

**BASES CONCEPTUALES PARA LA ESTIMACION DE LAS PROPIEDADES DE LOS BIOCOMBUSTIBLES  
Y SUS MEZCLAS**

**Ing. Lesly Patricia Tejada Benítez**

**Asesor de Tesis**

**PHD Bienvenido Sarría López**

**Tesis de grado para optar el título de Magister en Ingeniería**

**Universidad Tecnológica de Bolívar**

**Maestría en Ingeniería – Énfasis en Mecánica**

**Cartagena de Indias**

**Noviembre - 2011**

## RESUMEN

Las investigaciones sobre biocombustibles en Colombia y a nivel mundial se han concentrado en el efecto de las materias primas y diferentes tecnologías de producción sobre sus propiedades y desempeño. Sin embargo, hay poca información disponible sobre la estimación y modelación matemática de éstas propiedades. En esta investigación se elaboró un completo compendio bibliográfico relacionado con las propiedades de las mezclas de biocombustibles y las ecuaciones para estimarlas. Se incluye una metodología basada en ecuaciones conocidas para estimar las propiedades térmicas de las mezclas de biocombustibles con combustibles derivados del petróleo. Se estimó analíticamente la densidad, viscosidad, calor específico, punto de nube, número de cetano, conductividad térmica, capacidad calorífica, número de Prandtl, aire requerido para la combustión, análisis elemental y relación C/H para diferentes mezclas de etanol gasolina y diesel biodiesel. Los resultados de las predicciones se compararon con resultados experimentales reportados en la literatura científica. Se realizó el cálculo estequiométrico de la formación de los productos de la combustión con diferentes coeficientes de exceso de aire. Se evaluaron propiedades de estos productos tales como: composición, densidad, capacidad calorífica, viscosidad, conductividad térmica, número de Prandtl, datos importantes para el aprovechamiento térmico de los productos de la combustión de los biocombustibles y sus mezclas. Con base en el estudio de los productos de combustión se realizó el análisis de los impactos ambientales generados por el uso de los biocombustibles y sus mezclas. Finalmente se definieron los lineamientos para el montaje de un laboratorio para la certificación de la calidad de biocombustibles para la ciudad de Cartagena.

## ABSTRACT

Researches on biofuels in Colombia and worldwide have focused on the effect of raw materials and different production technologies over their properties and performance. However, little information is available about estimation and mathematical modeling of these properties. This research produced a comprehensive bibliographic compendium related to the properties of mixtures of biofuels and equations to estimate them. It includes a methodology based on known equations to estimate the thermal properties of blends of biofuels with petroleum fuels. Was estimated analytically the density, viscosity, specific heat, clouding point, cetane number, thermal conductivity, heat capacity, Prandtl number, air required for combustion, elemental analysis and relation C/H for different blends of ethanol-gasoline and diesel-biodiesel. The results of the predictions were compared with experimental results reported in the scientific literature. The stoichiometric calculation was performed for the formation of combustion products with different coefficients of excess air. The properties of these products were evaluated such as: composition, density, heat capacity, viscosity, thermal conductivity, Prandtl number, important data for the thermal use of products from the combustion of biofuels and their mixtures. Based on the study of combustion products was carried out the analysis of environmental impacts caused by the use of biofuels and their mixtures. Finally, were defined the guidelines for the assembly of a laboratory for the quality certification of biofuels for the city of Cartagena.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento en el uso de combustibles fósiles y el crecimiento del parque automotor se ha correlacionado con el aumento en la contaminación atmosférica y perturbaciones ambientales como el efecto invernadero, la lluvia ácida, el smog fotoquímico y el agotamiento de la capa de ozono.

El gobierno colombiano ha hecho un gran esfuerzo por mejorar la calidad de los combustibles usados en el territorio nacional. Una de las estrategias implementadas ha sido la mezcla de combustibles del petróleo con biocombustibles, combustibles derivados de biomasa.

Los biocombustibles se constituyen en un elemento importante de la economía colombiana, actualmente se producen en Colombia 1,275 millones de litros diarios de etanol y 1,638 millones de litros de biodiesel. Su importancia se evidencia en las 153000 hectáreas de tierra usada para el cultivo de palma y caña de azúcar, la generación de empleo 70.000 empleos directos, y principalmente en las ventajas de su uso en las mezclas con gasolina y diesel. Actualmente en todo el territorio nacional se mezcla el etanol con la gasolina en proporción E8 (8 % en volumen de etanol), mientras que las mezclas de biodiesel con diesel de petróleo se usadas son B10 en la zona norte del país, B8 en la zona andina y santanderes y B7 en la región de los llanos orientales.

Las materias primas, procesos de obtención, equipos y tecnologías utilizadas en la producción de biocombustibles son variadas. Cuando se mezclan con combustibles derivados del petróleo en diferentes proporciones, alteran sus propiedades, por lo cual su calidad debe ser estandarizada para garantizar la confiabilidad de los equipos donde se utilicen, la disminución del impacto ambiental y la integridad del combustible durante su almacenamiento y uso, en las propiedades de los gases producidos y en el aprovechamiento energético de los mismos.

Actualmente hay poca información disponible que permita estimar las propiedades fisicoquímicas y térmicas de los biocombustibles y sus mezclas cuando son usados en motores de combustión interna y quemadores.

La modelación de las propiedades termofísicas y termoquímicas de los combustibles y sus productos de combustión es una herramienta confiable que permite realizar estimaciones bajo diferentes condiciones del proceso ahorrando el tiempo y los recursos que se invierten en la experimentación directa.

En este trabajo se usaron diferentes ecuaciones analíticas y empíricas encontradas en la literatura para proponer metodologías que permitan la estimación de estas propiedades y su comparación con datos experimentales reales disponibles en la literatura científica. Se calcularon las emisiones producidas y las propiedades de estas emisiones, para finalmente realizar un análisis del impacto ambiental del uso de mezclas de biocombustibles en diferentes proporciones.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los combustibles son uno de los motores principales de la economía de un país y por años, el combustible tradicional y de mayor uso en el mundo ha sido el petróleo. La Figura 1.1 muestra la distribución de fuentes de energía a nivel mundial de acuerdo al informe de la Agencia Internacional de Energía (1).

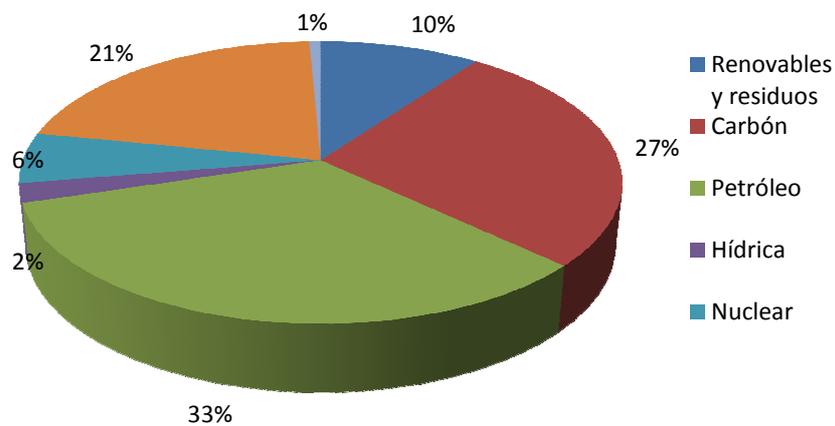


Figura 1.1 Uso de fuentes de energía a nivel mundial

En el caso de Colombia, en la distribución del uso de fuentes energéticas predomina el petróleo, pero debido a la riqueza de fuentes hídricas, ésta fuente energética es ampliamente usada. El informe anual de Olade (2) para el año 2009 se resume en la Figura 1 2.

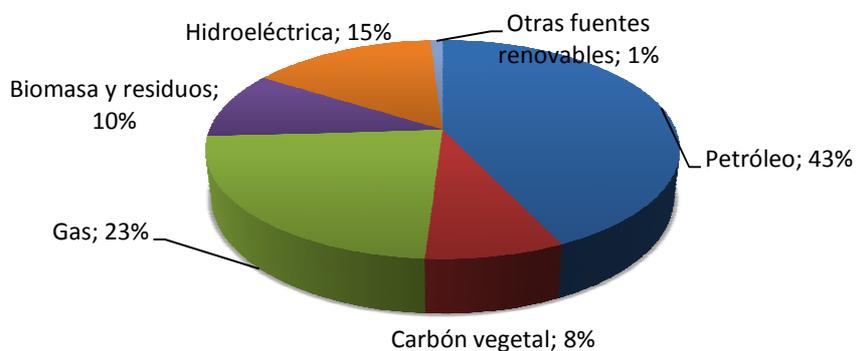


Figura 1 2. Uso de fuentes de energía en Colombia

Por otro lado, en los últimos años se ha evidenciado un progresivo aumento en los precios de los combustibles fósiles, debido principalmente a los problemas políticos e inestabilidad de los países en los cuales se concentran las principales reservas de petróleo, sumado a la creciente dificultad en el hallazgo de nuevas reservas petrolíferas en momentos en los cuales el consumo mundial creciente copa la producción mundial.

En relación con el deterioro ambiental, las actividades relacionadas con el sector transporte y de generación de energía son las dos principales fuentes antropogénicas responsables del efecto invernadero, seguidos del sector agrícola en tercer lugar.

El uso de combustibles derivados del petróleo y carbón ha crecido proporcionalmente con el aumento de la población y de la industrialización. Las emisiones de los gases contaminantes como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO y de partículas son la mayor desventaja del uso de estos combustibles. Además, su combustión ha aumentado aceleradamente los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, siendo la principal causa del calentamiento global. Esta situación es más crítica en el sector del transporte, donde en la actualidad no hay alternativas interesantes a los combustibles fósiles (3).

La búsqueda de fuentes de energía limpia y sostenible ha permitido el estudio de muchas opciones, con diferentes resultados, diversos desarrollos tecnológicos y aplicaciones. Como ejemplo se mencionan: la energía solar térmica y fotovoltaica, la energía hidroeléctrica, geotérmica, eólica y la energía de la biomasa (1). Cada opción tiene sus propias ventajas y limitaciones dependiendo del sector en el cual se aplique. En el caso del sector transporte, una opción es la sustitución gradual de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, como es el caso de los biocombustibles.

La producción de biocombustibles se presenta como una oportunidad para promover el desarrollo industrial y el empleo en las zonas rurales, permitir a largo plazo la sustitución de combustibles

fósiles, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero e impulsar la descarbonización de la combustibles en el sector transporte aumentando la seguridad del abastecimiento energético.

Los biocombustibles más comunes son el biodiesel y el bioetanol, que pueden sustituir al diesel y la gasolina, respectivamente, con poca o ninguna modificación de los motores de los vehículos. Se producen a partir de biomasa utilizando diferentes tecnologías y pueden distribuirse a los usuarios finales a través de los sistemas de distribución disponibles.

Aunque los biocombustibles se producen a un costo mayor que los combustibles fósiles, su producción ha ido aumentando en todo el mundo. La producción mundial se estima en más de 35 mil millones de litros (4). En la Unión Europea el biodiesel representa el 82% de la producción total de biocombustibles, y ha aumentado en Europa, Brasil y Estados Unidos, debido a las políticas económicas y ambientales de estos países.

En Colombia, desde el año 2005, se viene mezclando alcohol carburante en las gasolinas y desde el 2008 el biodiesel con el diesel de origen fósil (5). En el país se están produciendo 1.275.000 litros por día de alcohol carburante en seis plantas, para lo cual se están destinando 41.000 hectáreas cultivadas de caña de azúcar, ubicadas en los departamentos del Valle del Cauca, Cauca y Risaralda, y en todo el país se mezcla bioetanol al 8% con la gasolina. De igual forma, existen siete plantas productoras de biodiesel que producen 1,638 millones de litros por día de biodiesel, para lo cual se utilizan cerca de 14.000 hectáreas de palma de aceite, ubicadas en los departamentos del Cesar, Bolívar, Guajira y Norte de Santander.

Las condiciones del país hacen que éste tenga un potencial importante para el desarrollo de la agroindustria de biocombustibles. Dada la vocación agrícola del país, el desarrollo de los biocombustibles puede permitir el desarrollo del campo colombiano y constituir un frente estratégico de negocios para los empresarios. El desarrollo y producción de biocombustibles en

Colombia ha avanzado gracias a una serie de estímulos legales tendientes a promover tanto la producción como el consumo de éstos.

Los biocombustibles al ser mezclados en diferentes proporciones, alteran sus propiedades, de manera que cada mezcla tendrá una calidad fisicoquímica y térmica diferente.

Dado el número insuficiente de estudios relacionados con este tema, se identifica la necesidad de disponer de metodologías y procedimientos requeridos para la caracterización de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de los biocombustibles y sus mezclas cuando son usados en motores de combustión interna y quemadores, de manera que se garantice la confiabilidad de los equipos donde se utilicen y la disminución de emisiones atmosféricas. Por otro lado no se han reportado estudios a nivel mundial sobre las propiedades termofísicas y termoquímicas de los productos de la combustión de los mismos.

A nivel de Colombia no se han reportado estudios ni investigaciones encaminadas a predecir las propiedades de los biocombustibles y sus productos de combustión.

Adicionalmente, las materias primas, procesos de obtención, equipos y tecnologías utilizadas en la producción de biocombustibles son variadas, por lo cual su calidad debe ser estandarizada para garantizar la confiabilidad de los equipos donde se utilicen, la disminución del impacto ambiental y la integridad del combustible durante su almacenamiento y uso, de ahí la necesidad de disponer de laboratorios que certifiquen la calidad de los biocombustibles.

En la ciudad de Cartagena y en el departamento de Bolívar se producen, se mezclan, se comercializan y se usan los biocombustibles, sin embargo, no hay laboratorios que certifiquen su calidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, se encontró que no existen metodologías basadas en la modelación de las propiedades termofísicas y termoquímicas de los biocombustibles, sus mezclas y sus productos de combustión, existe poca información sobre el diseño de laboratorios para la certificación de la calidad de los biocombustibles, por lo cual en este proyecto se propone una metodología para la caracterización de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de los biocombustibles y sus mezclas cuando son usados en motores de combustión interna y quemadores y el diseño conceptual de un laboratorio para certificar la calidad de los biocombustibles.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo General**

Elaborar las metodologías y procedimientos necesarios para la caracterización de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de los biocombustibles y sus mezclas antes y después de ser usados en motores de combustión interna y quemadores y realizar el diseño conceptual de un laboratorio que certifique la calidad de los biocombustibles.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Desarrollar los métodos analíticos para calcular las propiedades termofísicas de los biocombustibles y sus mezclas.
- Obtener una herramienta computacional para la modelación de propiedades termofísicas y termoquímicas de los biocombustibles, sus mezclas y sus gases de combustión.
- Simular el proceso de combustión de los biocombustibles y sus mezclas en motores de combustión interna y quemadores para estimar las propiedades termofísicas de los productos de la combustión.
- Evaluar las emisiones generadas en la combustión de los biocombustibles y sus mezclas para estimar el impacto ambiental producido.
- Realizar el diseño conceptual de un laboratorio para certificación de las propiedades de los biocombustibles de acuerdo a las normas técnicas colombianas y en correspondencia con las normas internacionales.

## **4. MARCO TEORICO**

### **4.1 Biocombustibles**

Los combustibles son uno de las bases principales de la economía de un país. Sin embargo, por años, el combustible tradicional y de mayor uso en el mundo ha sido el petróleo. Es de conocimiento general, que el petróleo es un recurso energético de carácter no renovable, de alto costo, y que además de su alto potencial contaminante, ha sido la causa de múltiples conflictos mundiales.

Esta situación se torna más compleja cuando se suman los efectos de la contaminación ambiental y el calentamiento global atribuidos a la combustión de los derivados del petróleo y demás combustibles fósiles. En los motores de los vehículos, la combustión de la gasolina es imperfecta, por lo tanto, se emiten al ambiente toneladas de gases contaminantes. Cuando se agrega alcohol carburante a la gasolina, mejora significativamente el proceso de combustión en el motor, reduciendo la emisión de gases.

La producción de biocombustibles ha motivado interés económico, social, ambiental y político. En sentido económico, los altos precios del petróleo ponen en desventaja a países que no pueden abastecerse de este recurso. Desde lo social, la inversión en tierras, cultivos y plantas de biocombustibles han generado numerosos empleos en los países productores. Desde el punto de vista ambiental, se piensa que los biocombustibles son menos contaminantes al tener un menor impacto en el calentamiento global. Y en lo político, en muchos países han surgido normas y regulaciones relacionadas con el uso, producción y distribución de biocombustibles (6).

Biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que proceda de la biomasa, entendiendo como biomasa a los organismos recientemente vivos o sus

desechos metabólicos. Se cree que estos combustibles pueden sustituir a los combustibles fósiles más tradicionales, en virtud de su bajo o nulo deterioro ambiental y sus características de renovación.

El uso de estos genera una menor contaminación ambiental y son una alternativa viable al agotamiento ya sensible de energías fósiles, como el gas natural y el petróleo, donde ya se observa un desmesurado incremento en sus precios. Es importante destacar que los biocombustibles no son la única alternativa, sino una alternativa más en la búsqueda de fuentes de energía sustitutas, que sirvan de transición hacia una nueva tecnología como por ejemplo el hidrógeno.

Entre los biocombustibles podemos incluir el bioetanol, biodiesel, biometanol, biogás, biobutanol, entre otros. Siendo los dos primeros los más desarrollados, usados y comercializados.

Estas son algunas de las ventajas de los biocombustibles:

- Proporcionan una fuente de energía renovable y, por lo tanto, inagotable.
- Las emisiones de gas del invernadero son reducidas el 12% por la producción y la combustión del etanol y el 41% por el biodiesel.
- Revitalizan las economías rurales, y generan empleo al favorecer la puesta en marcha de un nuevo sector en el ámbito agrícola.
- Mejoran el aprovechamiento de tierras con poco valor agrícola y que, en ocasiones, se abandonan por la escasa rentabilidad de los cultivos tradicionales.
- Mejora la competitividad al no tener que importar fuentes de energía (6).

Una de las principales ventajas del uso de biocombustibles es la reducción en las emisiones de los principales gases contaminantes causantes del efecto invernadero, como lo son: el monóxido de carbono, el material particulado, los hidrocarburos volátiles no quemados, los aromáticos y otros contaminantes. Tal como se muestra en las tablas siguientes:

**Tabla 4.1 Emisiones de gases con etanol(7)**

Compuesto	Gasolina corriente (g/kWh)	E10 (g/kWh)
Monóxido de carbono (CO)	59.1	49.5
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	83.7	82.6
Hidrocarburos (HC) – (Metano, Butano, Benceno, Benzopireno, Benzofluoranteno)	4.1	3.6
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	2.5	2.2

**Tabla 4.1 Emisiones de gases con biodiesel expresadas en g/kg de combustible (8)**

Compuesto	DIESEL	B-5	B-10	B-20	B-100
Monóxido de carbono	34.02	31	31	29	18
Dióxido de carbono	3.123	3.110	3.093	3.060	2.813
Hidrocarburos	100	96	92	89	40
Óxidos de Nitrógeno	15.22	15	17.94	18.29	14

Países como Estados Unidos, China, o la Unión Europea decidieron incrementar de manera considerable la utilización de biocombustibles. Los combustibles derivados de la biomasa vegetal ofrecen una excelente oportunidad de energía alternativa convencional que puede tener un gran impacto no sólo sobre el crecimiento económico de los países, y sobre la seguridad energética y ambiental, sino también un fuerte impacto social dado por la creación de nuevos empleos en el sector rural e industrial, lo cual puede promover una mejor calidad de vida de la población (9).

Estados Unidos ha sido otro de los países que ha incursionado fuertemente en la producción de biocombustibles en los últimos años, a pesar de que no haya sido uno de los pioneros en este campo. Desde el año 2000 el gobierno ha instaurado políticas y leyes con el objetivo de aumentar la producción y empleo de biocombustibles. A partir de 1990 la industria del etanol ha sido la de mayor crecimiento en las zonas rurales de Estados Unidos. En el 2004 los biocombustibles en Estados Unidos representaban aproximadamente el 3% del consumo total de combustible para transporte (10).

El diverso número de fuentes para la obtención de biocombustibles hace que esta industria tenga cierta capacidad de elegir entre las diferentes opciones de cultivo, basada en las condiciones agronómicas de la zona a cultivar, así como en el comportamiento del mercado y en la efectividad para la obtención del producto final a partir del material no procesado (11).

En Colombia, de acuerdo a los objetivos de mezcla definidos para el mercado nacional, se aspira tener cerca de tres millones de hectáreas dedicadas a la producción de biocombustibles. Estos objetivos se plantearon a corto y mediano plazo y además se piensa en este proyecto con visión global y exportadora, puesto que el objetivo principal del Gobierno Nacional es desarrollar la caña de azúcar, la remolacha y yuca para producir alcohol carburante y la palma africana, jatropha e higuierilla para producir biodiesel. Tomando como referencia un millón de hectáreas en cultivos para alcohol, se tendría una producción aproximada de 25 millones de litros por día o equivalentes a 150 mil barriles por día. En el mismo sentido, sobre la base de dos millones de hectáreas en cultivos para biodiesel, se lograría una producción aproximada de 240 mil barriles por día. Bajo dicho panorama se generarían un millón de empleos formales y cuatro millones de colombianos que tendrían su sustento en los biocombustibles.

#### **4.2 Bioetanol**

La gasolina requiere de aditivos que aumenten su octanaje y disminuyan su capacidad autodetonante. Por esta razón hace unos años se le agregaba tetraetil de plomo, que fue eliminado en 1996 debido a la formación de óxido de plomo, seriamente nocivo para la salud. La adición de oxigenantes se inició en 1970 con la adición de metil terbutil éter que reduce la formación de compuestos aromáticos y monóxido de carbono, al realizarse una combustión más completa. Sin embargo, debido a su baja biodegradabilidad se hizo necesaria la búsqueda de nuevos oxigenantes, y es así como surge la biogasolina, una mezcla de gasolina y bioetanol.

#### **4.2.1 Definición**

El alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar o biomasa. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. El etanol se usa en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 o el 10%, E5 y E10 respectivamente, que no requieren modificaciones en los motores actuales.

#### **4.2.2 Materias primas**

Cualquier materia prima con un alto contenido de azúcar, o de ingredientes que se convierten en azúcar como el almidón o la celulosa, se puede usar para producir etanol. El etanol actualmente disponible en el mercado de biocombustibles se produce a partir de azúcar o de almidón. Los cultivos de azúcar comúnmente usados como materia prima son la caña de azúcar, la remolacha azucarera y el sorgo azucarado. Entre las féculas que se usan comúnmente como materia prima se encuentran el maíz, el trigo y la yuca (12).

Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. Para obtener los azúcares de la biomasa, esta es tratada con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa, que es entonces fermentada. Tres son los principales métodos para extraer estos azúcares: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática.

Los materiales lignocelulósicos son los que ofrecen un mayor potencial para la producción de bioetanol. Una gran parte de los materiales con alto contenido en celulosa, susceptibles de ser utilizados para estos fines, se generan como residuos en los procesos productivos de los sectores

agrícola, forestal e industrial. Los residuos agrícolas proceden de cultivos leñosos y herbáceos y, entre otros, hay que destacar los producidos en los cultivos de cereal. Por su parte, los residuos de origen forestal proceden de los tratamientos silvícola y de mejora o mantenimiento de los montes y masas forestales. También pueden utilizarse residuos generados en algunas industrias, como la papelera, la hortofrutícola o la fracción orgánica de residuos sólidos industriales (13).

La industria del etanol en América Latina y el Caribe, está construida principalmente sobre la provisión de caña de azúcar como materia prima.

#### **4.2.3 Ventajas del uso del etanol**

El uso del etanol como combustible presenta las siguientes ventajas:

- Reducción neta de la emisión de carbono, lo cual tiene una incidencia muy positiva en la problemática de cambio climático causado por los gases del efecto de invernadero.
- Genera empleos directos e indirectos, correspondientes a los empleos del agro, operación de biorefinerías y empleos temporales para la construcción y montaje de las mismas durante los primeros años. Lo anterior contribuiría a la ampliación y optimización de la frontera agrícola, llevándola incluso a las zonas de cultivos ilícitos, desarrollando las obras de infraestructura necesarias, lo cual tiene un efecto positivo y sinérgico en el desarrollo de las regiones.
- El alcohol y sus derivados serían muy importantes, no solamente para sustituir importaciones, sino también porque crearían nuevas exportaciones con un mayor valor agregado. Este aspecto podría ser un atractivo para la inversión extranjera y para proyectos de industrialización en el país.
- Mayor contenido de O<sub>2</sub> (menor cantidad de aditivo requerido)
- Mayor octanaje

- No es tóxico
- Reduce las emisiones de CO
- No contamina las fuentes de agua.

#### **4.2.4 Inconvenientes del uso del etanol como combustible**

A pesar de las ventajas mencionadas, la mezcla de etanol y gasolina puede presentar los siguientes inconvenientes:

- El problema crítico de la contaminación del aire en las grandes ciudades se debe, en primera instancia, a las partículas emitidas por buses y busetas a diesel; y en segundo lugar, a otro contaminante, el ozono, que se forma por las reacciones entre los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno, en presencia de la energía solar. Al agregarle alcohol a la gasolina no se soluciona el problema del hollín y, en cambio, puede empeorar la situación porque favorece el incremento en la concentración de otras sustancias peligrosas.
- Debido a la fuerte afinidad entre el agua y el alcohol, el agua puede ocasionar la separación de las fases, es decir, el alcohol y el agua se mezclan y se van hacia el fondo del tanque y cuando la bomba de combustible succiona el producto, podría estar solamente succionando agua mezclada con alcohol carburante y no la biogasolina. Adicionalmente podría generar corrosión de las estructuras y la pérdida de combustible.
- Por otra parte la adición de alcohol a la gasolina afecta la presión de vapor de la gasolina, incrementando una mayor cantidad de hidrocarburos volátiles hacia la atmósfera, tanto desde los tanques de almacenamiento, en las estaciones de servicio, como desde los tanques de combustible de cerca del millón de vehículos que circula en la ciudad. Como consecuencia de esa mayor cantidad de vapores en el aire, se genera la formación de una cantidad adicional de

ozono, que es una sustancia altamente oxidante de las vías respiratorias, debido a que los óxidos de nitrógeno también se producen en mayor cantidad cuando hay más oxígeno.

- El alcohol en la gasolina promueve una mayor formación de compuestos oxigenados de alto riesgo como el acetaldehído, reconocido como una sustancia con potencial de producir cáncer en humanos.

#### **4.2.5 Mezclas de etanol y gasolina**

El bioetanol ofrece diversas posibilidades de mezclas para la obtención de biocombustibles con los siguientes nombres y propiedades:

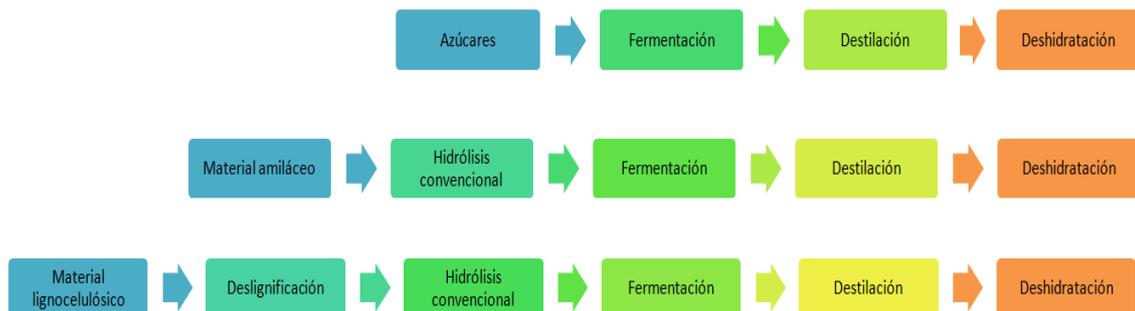
- E5: El Biocombustible E5 significa una mezcla del 5% de Bioetanol y el 95% de Gasolina normal. Esta es la mezcla habitual y mezcla máxima autorizada en la actualidad por la regulación europea, sin embargo, es previsible una modificación de la normativa europea que aumentará este límite al 10% (E10) ya que diferentes estudios constatan que los vehículos actuales toleran sin problemas mezclas hasta el 10% de Bioetanol y los beneficios para el medioambiente son significativos.
- E10: El Biocombustible E10 significa una mezcla del 10% de Bioetanol y el 90% de Gasolina normal. Esta mezcla es la más utilizada en EEUU, ya que hasta esta proporción de mezcla los motores de los vehículos no requieren ninguna modificación y e incluso produce la elevación del octano en la gasolina mejorando su resultado y obteniendo una notable reducción en la emisión de gases contaminantes.
- E85: Mezcla de 85% de Bioetanol y 15 % de gasolina, utilizada en vehículos con motores especiales. En EEUU las marcas más conocidas ofrecen vehículos adaptados a estas mezclas.
- E95 y E100: Mezclas hasta el 95% y 100% de Bioetanol son utilizados en algunos países como Brasil con motores especiales.

#### 4.2.6 Tecnologías de producción de bioetanol

El proceso de obtención de bioetanol depende de las materias primas usadas para su producción y se identifican tres procesos diferentes (12).

- Fermentación de azúcares seguido de destilación y deshidratación. Este proceso es el que se utiliza con materias primas como la caña de azúcar o remolacha azucarera.
- Sacarificación de almidón para convertirlo en azúcares fermentables, mediante este proceso se obtiene bioetanol a partir de la yuca, maíz, y papa.
- Hidrólisis de la celulosa, para igualmente transformarla en azúcares, este proceso permitiría utilizar residuos agrícolas y residuos de poda, entre otros.

La Figura 4.1 muestra el esquema de los tres procesos mencionados con sus etapas.



**Figura 4.1 Procesos de obtención de bioetanol**

- **Pretratamiento**

Cuando se trabaja con material lignocelulósico es necesario realizar un pretratamiento que puede ser seleccionado de la Tabla 4.3. En el pretratamiento se busca hacer el material más fácil de hidrolizar, obteniéndose un sustrato lignocelulósico accesible al ataque químico o microbiológico, de acuerdo al tipo de hidrólisis que se utilice. Adicionalmente durante el pretratamiento se logra

remover de manera parcial o total la lignina y la hemicelulosa, disminuir el carácter cristalino de las moléculas y reducir el tamaño de las partículas.

**Tabla 4.3 Métodos de pretratamiento de material lignocelulósico**

Método	Modo de acción
Físicos	Molienda Irradiación de alta energía Extracción con organosolventes
Químicos	Oxidantes(H <sub>2</sub> , ozono) Gases(ClO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> ) Álcalis (NaOH, NH <sub>3</sub> ) Ácidos Congelamiento explosivo.
Fisicoquímicos	Oxidación húmeda. Explosión por vapor. Autohidrólisis (Vapor)
Biológicos	Delignificación bacteriana y fúngica (biopulpado) Maceración xilanolítica Maceración pectinolítica.

- **Hidrólisis**

El objetivo del proceso de hidrólisis efectuado al material amiláceo y al material lignocelulósico es convertir estos materiales en azúcares fermentables. Puede realizarse por vía ácida usando ácido sulfúrico o clorhídrico diluido o concentrado o por vía enzimática usando diferentes tipos de microorganismos capaces de producir glucosa a partir de estas materias primas.

La gran ventaja del proceso de ácido diluido es su tasa de reacción, la cual es muy rápida, lo que facilita la transformación continua. La gran desventaja es el bajo rendimiento a nivel de azúcar. Para lograr un proceso rápido y continuo, produciendo una adecuada penetración del ácido, las materias primas deben ser reducidas a un tamaño máximo de partícula que puede ser no mayor al rango de milímetros. El proceso de ácido concentrado utiliza temperaturas medias y la única presión manejada es la que se da por el bombeo de material de un recipiente a otro.

- **Fermentación**

La fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico y exotérmico realizado por las levaduras y algunas clases de bacterias. Estos microorganismos transforman el azúcar en alcohol etílico y dióxido de carbono. La fermentación alcohólica, comienza después de que la glucosa entra en la celda. La glucosa se degrada en un ácido pirúvico. Este ácido pirúvico se convierte luego en CO<sub>2</sub> y etanol. Los microorganismos encargados de realizar esta transformación son las levaduras *Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces fragilis*, *Torulaspota* y *Zymomonas mobilis*.

Una tecnología de creciente interés es la SFS (Sacarificación y Fermentación Simultáneas) con el fin de realizar en un solo reactor los pasos de hidrólisis enzimática y fermentación alcohólica, previo pretratamiento físico. Es una técnica que requiere la modificación genética de los microorganismos para que puedan coexistir bajo las mismas condiciones los microorganismos responsables de la sacarificación y las levaduras fermentativas, responsables de la conversión de los azúcares en etanol.

#### **4.2.7 Calidad del bioetanol**

Dado que el etanol es una sustancia pura, sus parámetros de calidad están relacionados con las mezclas y contenido de sustancias indeseables generadas durante el proceso de fermentación o que se encontraban originalmente en la materia prima y no fueron eliminadas en las etapas de separación. De acuerdo a las normas internacionales, algunas características de importancia para el etanol y sus métodos de medición se presentan en la Tabla 2.4.

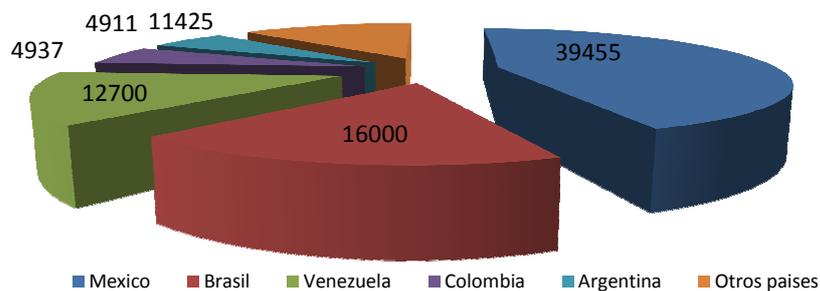
En Colombia, la norma colombiana NTC 5308 define alcohol carburante, como etanol anhidro obtenido a partir de la biomasa, con un contenido de agua inferior a 0.7% en volumen y especifica los parámetros de calidad que debe cumplir el bioetanol en el país.

**Tabla 2.4 Parámetros de calidad del bioetanol**

Parámetro	Unidad	Especificación	Método
Color	-	Incoloro	Visual
Acidez total como ácido acético	mg/100 ml	3.0	ASTM D 1613
pH	-	6,5 – 9,0	ASTM D 6423
Conductividad eléctrica	s/m	500	ASTM D 1125
Densidad a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	791.5	ASTM D 4052
Contenido de etanol	% vol	99,5	ASTM D 5501
Contenido de metanol	% vol	0,5	ASTM D 5501
Contenido de agua	% masa	0,2	ASTM E 203 o ASTM E 1064
Cloro inorgánico	mg/kg	0,03	ASTM D 512
Cobre	mg/kg	0,07	ASTM D 1688
Azufre	ppm	3	ASTM D 4806
Sulfatos	ppm	4	ASTM D 4806

#### 4.2.8 Demanda de bioetanol

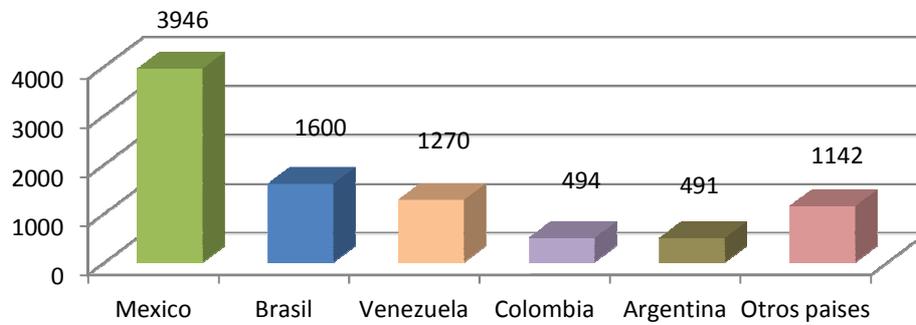
De acuerdo al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, en el año 2007, Estados Unidos consumió 548 millones de metros cúbicos de gasolina y en América Latina se consumieron cerca de 90 millones de metros cúbicos de gasolina, distribuidos principalmente entre México, Brasil, Venezuela, Colombia y Argentina, como se muestra en la Figura 3.2 (13).



**Figura 3.2 Consumo de gasolina en América Latina**

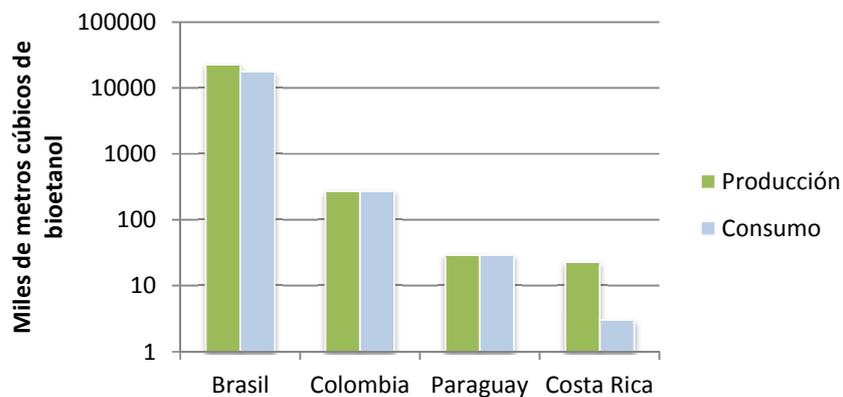
Este volumen de gasolina, al mezclarse con el etanol en proporción E10 (90% de gasolina y 10% de etanol), supondría una demanda de etanol de 54.8 millones de metros cúbicos para Estados

Unidos y de nueve millones de metros cúbicos para América Latina, distribuidos como se muestra en la Figura 4.4.3 (13).



**Figura 4.3. Demanda de etanol para E10**

Actualmente la producción de etanol en estos países la lideran Estados Unidos y Brasil con 16 millones de metros cúbicos cada uno. La Figura 4.44.4 muestra como Brasil lidera con gran ventaja la producción de etanol en América Latina, que sin la producción de Brasil llega a 3.6 millones de metros cúbicos (2).

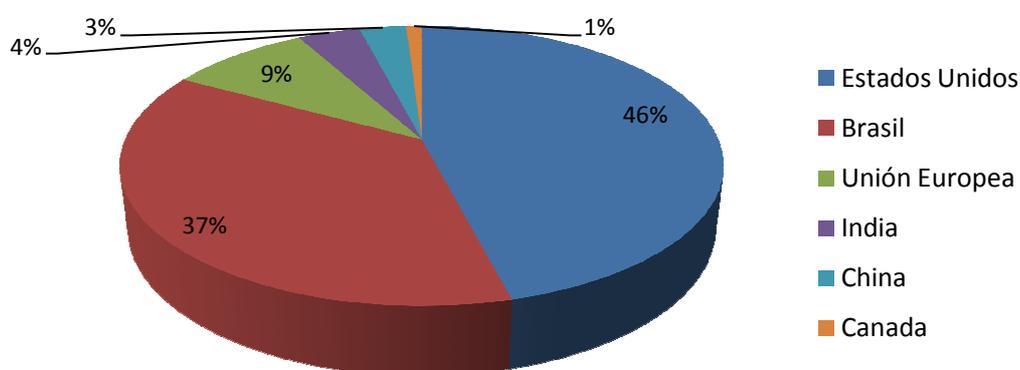


**Figura 4.4 Producción de etanol en América Latina**

De lo anterior se concluye, que en América latina, con la implementación de la gasolina E10, habría una demanda de etanol insatisfecha, lo cual incentivaría la industrialización de este sector.

#### 4.2.9 El bioetanol en el mundo

La producción de bioetanol a nivel mundial ha crecido durante los últimos veinte años a una tasa de nueve por ciento anual y su producción global durante el 2010 se calcula ascendió a 83 mil millones de litros (2). Los principales productores son Estados Unidos con 45 mil 400 millones de litros y Brasil con 27 mil 520 millones de litros en un segundo lugar como se aprecia en la Figura 4.54.5 según datos de la Agencia Internacional de Energía.



**Figura 4.5. Producción de etanol en el mundo en 2007**

En Estados Unidos, el 90% del etanol se obtiene del cultivo de maíz. Sin embargo otras alternativas se están considerando como el empleo de sorgo en grano, la remolacha, la celulosa y los desechos sólidos municipales. En Estados Unidos se ha generalizado el uso del maíz como fuente de bioetanol a causa de la larga experiencia de los cultivadores de este producto, junto con el alto rendimiento de las variedades utilizadas y el gran desarrollo tecnológico en la extracción del bioetanol a partir del almidón del grano (1).

Brasil fue uno de los primeros países en implementar la producción de bioetanol y es mundialmente reconocido como el país líder en producción de biocombustibles, particularmente etanol. Toda la gasolina de Brasil está formada por una mezcla de 20-26% de etanol, la cual se conoce como gasohol. Desde el 2003 Brasil cuenta con vehículos flex-fuel, los cuales pueden

emplear etanol, gasolina, o una mezcla de los dos, ofreciéndole al consumidor la flexibilidad de decidir cuál combustible incorporar en su automóvil. La materia prima principal para la producción de bioetanol en Brasil la constituye la caña de azúcar (13).

En países asiáticos como Tailandia y China se empiezan a generar una industria de producción de bioetanol a partir del cultivo de yuca, el cual tiene una larga tradición en estas zonas y que tiene a Tailandia como su mayor productor a nivel mundial.

En lo referente al uso, muchos países han planteado estrategias para implementar la mezcla de bioetanol con gasolina, Alemania comenzó con el 6,75% en 2010 con previsión de aumento al 8% para 2015 y al 10% para 2020 de acuerdo a los objetivos de la Unión Europea, Brasil tiene como política la mezcla obligatoria de 20 al 25% de etanol anhidro con gasolina desde el 2008. Canadá comenzó mezclando 5% de etanol con la gasolina desde 2010. China proyecta usar mezclas del 15% para 2020. Estados Unidos. Francia inició con 5,75% en el 2008 y proyecta 7% para 2010 y 10% para 2015. La política de India es la obligación de mezclar entre el 5-10%. Italia inició mezclando el 5,75% en 2010 y proyecta el 10% para 2020. Inglaterra comenzó en el 2010 mezclando el 5% y proyecta el 10% para 2020. Sudáfrica comenzó mezclando el 8 % en 2006 y evalúa la mezcla del 10% (12).

#### **4.2.10 El bioetanol en Colombia**

El bioetanol en Colombia es reglamentado por la Ley 693 del 2001 que estableció que la debe contener compuestos oxigenados como los alcoholes carburantes. Se decretó además que el uso de etanol carburante recibirá un tratamiento especial en las políticas sectoriales de autosuficiencia energética, de producción agropecuaria y de generación de empleo. La Ley 693 busca como objetivos principales disminuir las emisiones de hidrocarburos y de monóxido de carbono a la atmósfera, causadas por los motores de combustión, mejorar la sostenibilidad

ambiental, mantener y generar empleos en el sector agrícola e industrial, desarrollar el sector agroindustrial y contribuir al propósito estratégico de autosuficiencia energética. Posteriormente se han desarrollado una serie de estímulos tributarios encaminados a incentivar el desarrollo y empleo de biocombustibles. La Ley 788 de 2002 declara exento del IVA al alcohol carburante con destino a la mezcla con el combustible motor y se exoneró del pago del impuesto global y de la sobretasa al porcentaje de alcohol carburante que se mezcle con la gasolina motor. De igual manera se han expedido varias resoluciones en 2003 en donde se establecen los criterios técnicos y ambientales y las políticas de precios de los biocombustibles. Recientemente el estado Colombiano decretó la introducción progresiva en el mercado de vehículos con la capacidad de funcionar con diferentes mezclas de gasolina y etanol, llegando hasta un 85% de contenido de etanol (E85). Para el año 2012, todos los vehículos comercializados en el país deberán cumplir este requerimiento (5).

La producción de bioetanol en Colombia se ha centrado en el empleo de la caña de azúcar como materia prima, aprovechando las ventajas que ésta ofrece y la tradición y desarrollo del sector cañero en Colombia. Actualmente existen seis plantas principales en Colombia para la producción de etanol ubicadas en el Valle del Cauca y Risaralda como se ve en la Figura 4.64.6, las cuales producen cerca de un millón de litros diarios de alcohol carburante.

Existen sin embargo, otros proyectos que están en desarrollo, o en estudio de factibilidad: En la región de la Hoya del Río Suárez en Santander, Quindío, y Boyacá. Estos hechos demuestran el dinamismo que se ha generado en Colombia alrededor de los biocombustibles, al igual que evidencian la posibilidad de utilizar diferentes fuentes para la obtención de bioetanol, lo cual a largo plazo generaría una estabilidad importante en el mercado y cierto grado de independencia de los combustibles fósiles.



Figura 4.6. Plantas de bioetanol en Colombia, Fuente: Fedecombustibles, 2011.

### 4.3 Biodiesel

#### 4.3.1 Definición

El biodiesel es una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga y corta, los cuales son producidos por la transesterificación de aceites triglicéridos con alcoholes monohidratados. Las materias primas usadas para la obtención de biodiesel son aceites vegetales y grasas animales, comúnmente usados para el consumo humano, por lo cual pueden conducir a un aumento en el precio de los alimentos y aceites comestibles (14).

#### 4.3.2 Materias primas

El biodiesel se puede producir a partir de aceites vegetales como soya, maní, palma, girasol, higuierilla, coco, aceites de frituras, y las grasas animales, como las del cerdo o pollo (15).

- **Aceite de girasol**

El aceite de girasol, es rico en ácido linoléico, fácilmente oxidable. En el aceite de girasol convencional, el triglicérido mayoritario es el linoleico – linoleico – linoleico, que representa alrededor de un tercio del total. Como sucede en otros aceites vegetales, en el aceite de girasol el ácido palmítico ocupa preferentemente las posiciones 1 y 3 de los triglicéridos (16).

- **Aceite de coco**

El coco fresco tiene un contenido de aceite de alrededor del 23%. El aceite de coco es muy rico en ácidos grasos saturados de longitud de cadena media. Dada su baja insaturación, es una grasa muy estable químicamente. Tiene alto contenido de ácido láurico (17).

- **Aceite de soya**

La semilla de soya contiene un 20% de aceite y un 35% de proteína. El aceite está formado por un 88% de triglicéridos. El ácido graso predominante es el ácido linoleico, con altos contenidos de ácido oleico. El triglicérido mayoritario es el linoleico – linoleico – linoleico, que representa cerca del 19% del total (18).

- **Aceite de palma**

La palma de aceite es muy productiva. De cada árbol puede obtenerse anualmente hasta 20 toneladas de racimos cada año. Tanto la pulpa del fruto como la semilla contienen alrededor del 50% de aceite. El aceite de palma contiene alrededor del 97% de triglicéridos. Los ácidos grasos fundamentales son el palmítico y el oleico, dependiendo de la especie, variedad y condiciones de cultivo (19).

- **Grasas de animales**

El sebo animal tiene diferentes grados de calidad respecto a su utilización en la alimentación, empleándose los de peor calidad en la formulación de los alimentos de animales. La grasa de pollo

es considerada una grasa saturada. Su contenido en linoleico varía entre 16 y 25%, en función de la alimentación de las aves previo al sacrificio. La grasa vacuna se propone como una materia prima alternativa por ser un subproducto de la industria cárnica y de bajo valor nutricional. Se han encontrado dificultades debido a la solidificación de la materia prima y del producto a temperatura ambiente. Para modificar estas propiedades físicas de la grasa vacuna se ha propuesto el fraccionamiento de la misma. La fracción con mayor punto de fusión, se denomina estearina y la de menor punto de fusión, oleína. La oleína es más adecuada para la obtención de biodiesel (16).

- **Aceite de frituras**

El aceite de fritura usado es una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiesel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitan los costos de tratamiento como residuo. Los aceites usados presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible. Mediante un sistema de recogida se trabaja con los principales generadores de aceite usado de fritura y se llevan a una planta gestora de aceites donde son reciclados, lavados, se les eliminan las impurezas y la humedad (20).

- **Aceite de microalgas**

Muchas investigaciones reportan las ventajas de las microalgas sobre otras materias primas para la obtención de biodiesel. Son fáciles de cultivar, crecen con poca o ninguna atención, requieren poco agua, los nutrientes son de fácil acceso. Las microalgas se reproducen mediante la fotosíntesis para convertir la energía solar en energía química, completando la totalidad del ciclo de crecimiento cada pocos días. Pueden crecer casi en cualquier lugar, aunque las tasas de

crecimiento pueden acelerarse mediante la adición de determinados nutrientes y aireación suficiente (21).

Diferentes especies de microalgas se pueden adaptar a variedad de condiciones ambientales a diferencia de otras materias primas para obtener biodiesel como aceite de palma, soya y otros. Es posible entonces encontrar especies adaptadas a entornos locales específicos. Tienen tasas de crecimiento mucho más altas, mayor productividad y requieren menor superficie cuando se comparan con otros cultivos, reduciendo la competencia por el uso del suelo.

Las microalgas proporcionan materia prima para otros tipos de combustibles renovables como el biodiesel, biogás, hidrógeno y bioetanol. El biodiesel de microalgas no contiene azufre y se desempeña igual que el diesel de petróleo, reduciendo la emisión de partículas, CO, hidrocarburos, y SOx. Sin embargo las emisiones de NOx pueden ser mayores en algunos tipos de motores.

#### **4.3.3 Parámetros de calidad**

La calidad del biodiesel es generalmente controlada a través de ciertos parámetros físicos y químicos establecidos por normas técnicas aprobadas en cada país. Los parámetros más importantes son los que interfieren en el funcionamiento y durabilidad del motor, en la potencia desarrollada y en la generación de emisiones y gases contaminantes. Las propiedades más relevantes se mencionan a continuación (22).

- **Viscosidad**

La viscosidad dinámica es una propiedad por medio de la cual los fluidos ofrecen resistencia a los esfuerzos tangenciales que tienden a deformarlo. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en Pa.s (Pascal por segundo). Algunos motores requieren una viscosidad mínima para

evitar pérdidas durante la inyección del combustible. El biodiesel tiene generalmente mayor viscosidad que el diesel.

La viscosidad cinemática se define como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad. Se expresa en Stokes.

- **Cenizas sulfatadas**

La cantidad de cenizas sulfatadas indirectamente mide la cantidad de álcalis del catalizador u otros compuestos que producen depósitos en el inyector o en el sistema de combustible.

- **Azufre total**

La cantidad total de azufre limita las emisiones de SO<sub>x</sub> producidos en la combustión y que en la atmósfera producen ácidos de azufre.

- **Corrosión a la lámina de cobre**

Esta prueba indica problemas potenciales con la presencia de partes de cobre o bronce en el sistema de combustible del motor. Si el combustible contiene ácidos o compuestos de azufre puede causar corrosión en el cobre o bronce.

- **Índice de yodo**

Cuando el índice de yodo es alto indica exceso de ácidos grasos insaturados, lo cual puede producir polimerización del ácido, deterioro del aceite lubricante, pérdida de estabilidad ante la oxidación y procesos de hidrólisis.

- **Punto de nube o de enturbiamiento**

El punto de enturbiamiento muestra las menores temperaturas ambientes donde el biodiesel puede operar sin calentamiento.

- **Carbón residual**

Los residuos de carbón miden la tendencia a formación de depósitos de carbón en el inyector y en la culata del motor.

- **Número de acidez**

El número de acidez indica el aumento de la existencia de ácidos grasos libres en el biodiesel en caso de mala calidad del producto o de degradación por oxidación. La acidez de las materias primas viene dada por ácidos grasos libres, que en presencia de una base y agua se transforman en jabones.

- **Contenido de glicerina**

Los valores altos de glicerina libre y total indican problemas de separación entre el biodiesel y la glicerina, así como conversión. Altos niveles de glicerina libre pueden causar depósitos en los inyectores, obstruir el sistema de inyección causando acumulación de glicerina libre en el fondo de los sistemas de almacenamiento y de inyección de combustible.

- **Número de cetano**

Mide la calidad de ignición de un combustible diesel. Un alto número de cetano indica un menor retraso en la ignición, ayuda a un mejor arranque del motor y minimiza la emisión de humo al lograr una combustión más suave.

- **Contenido de fósforo**

El fósforo puede estar presente en aceites vegetales y grasas animales usadas como materia prima para la elaboración de biodiesel. Valores altos de fósforo se deben a deficiencias de purificación, lo que genera inconvenientes en el convertidor catalítico.

- **Contenido de éster**

El contenido de éster es un indicador de la conversión de la reacción. Bajos valores indican que la reacción fue incompleta, y por consiguiente hay presencia de aceite.

- **Contenido de metanol**

Altos valores de metanol son provocados cuando hay dificultad en el proceso de separación por destilación y en el de lavado con agua, provocando bajo punto de inflamación, baja viscosidad, baja densidad y corrosión en partes de aluminio y zinc.

- **Punto final de ebullición**

La determinación del punto de 90% recogido en la destilación ayuda a prever el comportamiento de la combustión, porque las gotas líquidas del biodiesel que entran en el motor deben evaporarse y mezclarse con el aire caliente de la compresión para entonces quemarse. El biodiesel tiene rango de destilación menor que el diesel.

- **Lubricidad del biodiesel**

La lubricidad es importante porque el sistema de inyección posee alta precisión mecánica y es lubricado por el combustible. La adición de un 2% de biodiesel en el diesel mejora su lubricidad de forma importante.

- **Punto de inflamación**

Mide la tendencia de un combustible de formar mezclas inflamables con el aire. En el biodiesel este límite se utiliza para garantizar que se haya removido todo el metanol.

- **Estabilidad a la oxidación**

Bajos valores de estabilidad a la oxidación son causados por un aceite originalmente degradado que causa la degradación del biodiesel durante el proceso. Las consecuencias son baja estabilidad

durante el almacenamiento, problemas en el proceso de distribución, formación de sedimentos y generación de gomas.

- **Densidad**

La densidad se define como la masa por unidad de volumen. En los líquidos el volumen varía mucho con la temperatura y poco con la presión, y lo mismo ocurre con su densidad. Cuando aumenta la temperatura aumenta el volumen y, si no varía la masa, disminuye el valor de la densidad. En las tablas de densidades debe especificarse la temperatura a la que se determinó cada valor de densidad del líquido. De igual forma, debe tenerse en cuenta la temperatura del líquido en el momento de la medición. Como los gases son muy compresibles, además de la temperatura también ha de especificarse la presión absoluta a la cual se determinó su densidad.

La densidad relativa se define como el cociente entre la densidad de un cuerpo y la de otro que se toma como referencia en iguales condiciones de temperatura y presión. Para líquidos, la sustancia de referencia es el agua a una presión de 1 atm y la temperatura de 4 °C., bajo estas condiciones la densidad absoluta del agua es 1000 kg/m<sup>3</sup>. La densidad relativa es adimensional.

- **Estabilidad Térmica**

Esta propiedad proporciona una indicación de térmica de la estabilidad oxidativa de los combustibles cuando se calientan a altas temperaturas simulando lo que puede producirse en algunos motores o en los sistemas de recirculación del quemador.

- **Cantidad de agua**

El exceso de agua en el biodiesel provoca reacciones de hidrólisis generando problemas de corrosión en las partes del motor. Adicionalmente ocasiona el crecimiento bacteriológico con la consecuente obstrucción de los filtros.

- **Punto de escurrimiento**

Es la temperatura más baja a la cual fluirá un líquido. Por definición, el punto de escurrimiento es 3°C mayor que la temperatura de congelación. El punto de escurrimiento depende de la viscosidad.

La Tabla 4.3 presenta una comparación entre los parámetros usados entre las propiedades típicas de diesel del petróleo y el biodiesel (14).

**Tabla 4.3. Propiedades del biodiesel y el diesel**

Datos físico – químicos	Biodiesel	Diesel
Composición combustible	Ester metílico C <sub>12</sub> -C <sub>22</sub>	Hidrocarburo C <sub>10</sub> -C <sub>21</sub>
Poder calorífico inferior, kcal/kg	9500	10800
Viscosidad cinemática, mm <sup>2</sup> /s (40°C)	1,9 – 4,1	1,9 – 6,0
Peso específico, g/cm <sup>3</sup>	0,875 - 0,900	0,850
Azufre, % P	0	0,2
Punto ebullición, °C	190 - 340	180 - 335
Punto inflamación, °C	120 - 170	60- 80
Punto escurrimiento, °C	-15 / +16	-35 / -15
Número de cetano	40 - 51	47 -51
Relación Aire/Combustible	13,8	15

Los países donde el biodiesel es usado tienen sus propios parámetros de calidad. La Tabla 4.4 reúne los parámetros internacionales de calidad del biodiesel en algunos países.

El Gobierno Nacional a través de ICONTEC creó en el año 2006 la NTC, la cual incluye especificaciones para el uso de biodiesel y sus mezclas. Esta norma define los límites permisibles de algunas sustancias indeseables en el biodiesel y los valores óptimos para otros parámetros que afectan la eficiencia del biodiesel como combustible. Esta norma establece como métodos de ensayo las normas americanas ASTM D6751 y normas europeas EN 14214 que se muestran en la Tabla 4.4 y Tabla 4.7 (22).

**Tabla 4.4. Parámetros internacionales de calidad del biodiesel**

<b>PAISES</b>	<b>Europa</b>	<b>Austria</b>	<b>Francia</b>	<b>Alemania</b>	<b>Italia</b>	<b>Suecia</b>	<b>USA</b>	<b>Australia</b>
Densidad 15°C g/cm	0.86 - 0.90	0.85 - 0.89	0.87 - 0.90	0.875 - 0.90	0.86 - 0.90	0.87 - 0.90	-	860 to 890 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad 40°C mm <sup>2</sup> /s	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5- 5.0	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-5.0
Punto de inflamación °C	>120	>100	>100	>110	>100	>100	>130	>120
Azufre % masa	<10 mg/kg	<0.02	-	<0.01	<0.01	<0.001	<0.05	10 - 50 mg/kg
Humedad mg/kg	<500	-	<200	<300	<700	<300	<0.05% vol	<0.05% vol
Indice de Cetano	>51	>49	>49	>49	-	>48	>47	>51
Metanol % masa	<0.20	<0.20	<0.1	<0.3	<0.2	<0.2	-	<0.2
Contenido de Ester % masa	>96.5	-	>96.5	-	>98	>98	-	>96.5
Glicerol total % masa	<0.25	<0.24	<0.25	<0.25	-	-	<0.24	<0.25
Indice de Yodo	<120	<120	<115	<115	-	<125	-	-
Fósforo mg/kg	<10	<20	<10	<10	<10	<10	<0.001% masa	<10
Alcalinidad mg/kg	-	-	<5	<5	-	<10	-	-

**Tabla 4.5. Especificaciones de Calidad del Biodiesel (Norma Técnica Colombiana NTC 5444)**

Característica	Norma técnica	Característica	Norma técnica
Viscosidad Cinemática	Norma ASTM D 445 o ISO 3104	Contenido de éster	Norma EN 14103
Densidad a 15°C	Norma ASTM D 4052 o ISO 3675	Contenido de alquilester de ácido linoleico	Norma EN 14103
Punto de Inflamación	Norma ASTM D93 o Norma ISO 2719	Índice de yodo	Norma EN 14111
Contenido de Agua	Norma ASTM E 203 o ISO 12937	Azufre	Norma ASTM D4294, ASMT D 2622 ASTM D 1552 o D 1266
Número de cetano	Norma ASTM D 613 o ISO 5165	Contenidos de Aromáticos	Norma ASTM D5186 ó ASTM D1319
Contaminación Total	Norma EN 12662	Contenido de Biocombustible	Norma EN 14708
Corrosión lámina de cobre	Norma ASTM D 130 o ISO 2160	Color	Norma ASTM D1500
Estabilidad a la oxidación	Norma EN 14112 y Norma ASTM D4625	Gravedad API	Norma ASTM D4052, ASTM D1298 ó ASTM D287
Estabilidad Térmica	Norma ASTM D 6468	Agua y Sedimento	Norma ASTM D1796 ó ASTM D 2709
Cenizas sulfatadas	Norma ASTM D 874 o ISO 3987	Lubricidad	Norma ASTM D6079
Contenido de fósforo	Norma ASTM D 4951 o ISO 14107	Contenido de calcio y magnesio	Norma ASTM D 5863 o EN 14108 y EN 14109
Destilación (PFE)	Norma ASTM D 86 o ISO 3405	Contenido de Monoglicéridos	Norma ASTM D 6584 o ISO 14105
Número ácido	Norma ASTM D 664 o EN 1404	Contenido de Diglicéridos	Norma ASTM D 6584 o ISO 14105
Temperatura de Obturación del filtro frío	Norma ASTM D6371 o EN 116	Contenido de Triglicéridos	Norma ASTM D 6584 o ISO 14105
Punto de nube	Norma ASTM D 2500 o ISO 3015	Glicerina libre y total	Norma ASTM D 6584 o ISO 14105 y ISO 14106
Punto de fluidez	Norma ASTM D 97	Contenido de metanol o etanol	Norma ISO 14110
Carbón residual	Norma ASTM D 4530 o ISO 10370	Contenido de sodio y potasio	Norma ASTM D 5863 o EN 14108 y EN 14109

#### 4.3.4 Composición del biodiesel

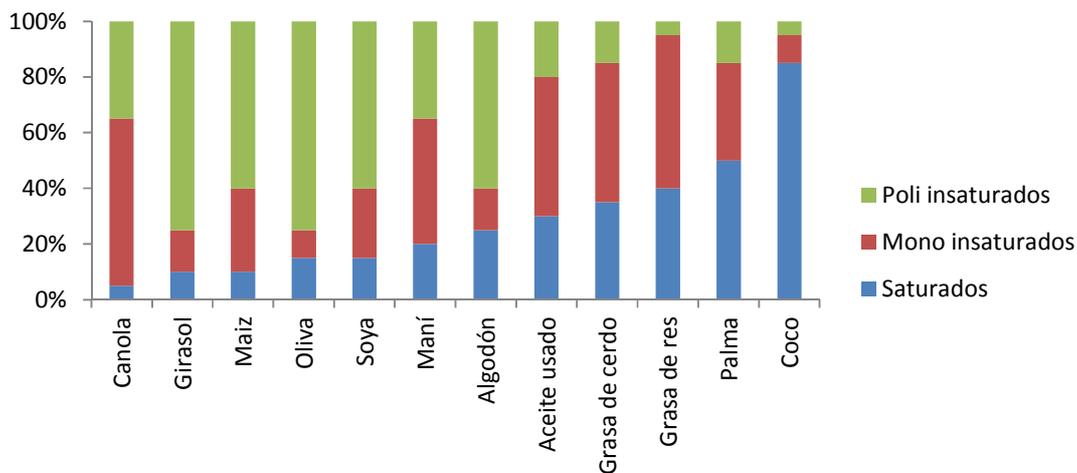
El biodiesel generalmente es una mezcla de ésteres de alquilo menores de ácidos grasos de cadena par, que en general van del C<sub>4</sub> al C<sub>24</sub>, debido a la naturaleza de las grasas y aceites de

origen animal y vegetal. Las características y propiedades del biodiesel dependen del porcentaje de cada ácido graso presente en el aceite o grasa de donde fue producido (23).

El punto de fusión crece con el tamaño de la cadena de átomos de carbón y, para un mismo número de átomos de carbón, con la saturación. Los ésteres poli-insaturados poseen los más bajos puntos de fusión. De modo general, el número de cetano, el calor de combustión, el punto de fusión y la viscosidad aumentan con el tamaño de la cadena carbónica y disminuyen con el aumento de la insaturación. Algunos ésteres poseen un punto de fusión muy alto, siendo éste el origen del problema del uso de B100 a bajas temperaturas ambientes.

Las propiedades de cada biodiesel son determinadas por el porcentaje de cada éster presente en la mezcla. La saturación afecta tres propiedades importantes: el número de cetano, el punto de enturbamiento y la estabilidad a oxidación. El biodiesel producido por ácidos grasos saturados posee mayor número de cetano y estabilidad que los insaturados, pero es difícil de emplear en bajas temperaturas por su alto punto de enturbamiento (22).

Es posible predecir el comportamiento del biodiesel producido de cada materia prima si se conoce su composición. La Figura 4. muestra la composición típica de ácidos saturados, mono-insaturados y poli-insaturados para diferentes oleaginosas y grasas animales normalmente usados como materia prima para la obtención de biodiesel. Por ejemplo, el biodiesel producido a partir de coco o de palma tendrá números de cetano alto y alta estabilidad, pero será de difícil uso a bajas temperaturas. Por otro lado, el biodiesel producido de girasol tendrá menor número de cetano y menor estabilidad, pero tendrá mejores propiedades para uso en bajas temperaturas (15).



**Figura 4.7. Composición típica de aceites y grasas**

#### 4.3.5 Desempeño del biodiesel en el motor

El biodiesel se quema perfectamente sin requerir grandes modificaciones en motores existentes pudiendo alimentarse alternativamente con el combustible diesel o en mezcla de ambos. El empleo de biodiesel aumenta la vida de los motores debido a que posee un poder lubricante mayor, mientras que el consumo de combustible, la autoignición, la potencia y el torque del motor permanecen inalterados. Se deben cambiar las líneas que llevan el biodiesel desde el depósito hasta el motor por plástico resistente para evitar que el biodiesel las degrade.

En la operación de carga parcial, no hay diferencias en la potencia de salida, ya que un aumento en el consumo de combustible en el caso del biodiesel podría compensar su reducido valor calorífico. En condiciones de plena carga, se ha encontrado un descenso de potencia. Un aumento en la relación consumo de combustible y potencia al freno se presenta al utilizar el biodiesel. Este aumento es proporcional a la reducción en el poder calorífico (24).

#### **4.3.6 Emisiones del biodiesel**

Una gran disparidad de resultados se ha encontrado en general relativa a las emisiones de biodiesel. Una de las razones es el gran número de motores de diferente tecnología de la prueba, las diferentes condiciones de funcionamiento o ciclos de conducción, los diferentes combustibles biodiesel utilizados a partir de diferentes materias primas y con distintas calidades, y las diversas técnicas de medición y procedimientos aplicados.

La mayoría de los estudios han encontrado fuertes reducciones en las emisiones de partículas con el biodiesel, en comparación con combustible diesel. Esta reducción es causada principalmente por el alto contenido de oxígeno y la ausencia de hidrocarburos aromáticos en el biodiesel. La mayoría de los autores han informado de disminuciones en el diámetro medio de las partículas suspendidas cuando se usa biodiesel como combustible. Aunque ese cambio se debe principalmente a una drástica disminución en el número de partículas grandes, algunos estudios también han encontrado un cierto aumento en el número de los más pequeños.

La mayoría de estudios reportan un ligero aumento de las emisiones de NO<sub>x</sub> al utilizar combustibles biodiesel. Las propiedades físicas de biodiesel o la respuesta de la unidad electrónica podría causar esos aumentos. Algunos autores proponen retrasar la inyección como medida para eliminar el aumento de emisiones de NO<sub>x</sub>, con un sacrificio menor en las emisiones de partículas (25).

#### **4.3.7 Ventajas del uso del biodiesel**

La obtención y uso del biodiesel trae ventajas innumerables entre las que se destacan las siguientes:

- ✓ No requiere mayores modificaciones para su uso en motores diesel comunes.
- ✓ Es obtenido a partir de aceites vegetales, totalmente renovables.

- ✓ Permite al productor agropecuario autoabastecerse de combustible.
- ✓ Permite a países agrícolas independizarse de los países productores de petróleo.
- ✓ Tiene un gran poder de lubricación y minimiza el desgaste del motor.
- ✓ Presenta un menor nivel de emisiones gaseosas de combustión nocivas.
- ✓ Su rendimiento en motores es similar diesel común.
- ✓ Puede utilizarse en mezclas con gasoil común en cualquier proporción.
- ✓ No altera sustancialmente el consumo del biocombustible como tal.
- ✓ Reduce en gran medida los humos visibles durante el arranque.
- ✓ Posee una gran biodegradabilidad.
- ✓ Es aproximadamente diez veces menos tóxico que la sal común de mesa.
- ✓ Su transporte y almacenamiento es más seguro dado su alto Temperatura de Inflamación.
- ✓ Puede producirse a partir de cultivos abundantes en el país, como la palma.
- ✓ Ya ha sido probado satisfactoriamente por más de 20 años en Europa.
- ✓ No contiene azufre, y permite el uso de catalizadores.
- ✓ Los proyectos de inversión asociados son una buena fuente de empleos.
- ✓ El biodiesel no es nocivo para la salud humana, para la vegetación, los animales vivos y no daña monumentos y/o edificios.
- ✓ El olor de combustión asemeja el olor a fritura, a diferencia del olor del gasoil.

#### **4.3.8 Desventajas del uso del biodiesel**

- ✓ Presenta elevados costos de materia prima, aunque esta se ve desde el punto de vista de cada país, ya sea porque este no sea agrícola u otras razones, en el caso de Colombia no habría problema.
- ✓ Su combustión puede acarrear un aumento de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).
- ✓ Presenta problemas de fluidez a bajas temperaturas (menores a 0°C)

- ✓ Presenta escasa estabilidad oxidativa, y su almacenamiento no es aconsejable por períodos superiores a seis meses.
- ✓ Su poder solvente lo hace incompatible con una serie de plásticos y elementos derivados del caucho natural, y a veces obliga a sustituir mangueras en el motor.
- ✓ Su carga en tanques ya sucios por depósitos provenientes del gasoil puede presentar problemas cuando por su poder solvente limpia dichos depósitos, acarreándolos por la línea de combustible.

La calidad del biodiesel tiene muchas implicaciones técnicas relacionadas con el desempeño del motor, eficiencia de la combustión y generación de emisiones. Se ha encontrado que el uso del biodiesel como combustible puede originar formación de depósitos por exceso de metales formadores de cenizas, abrasión por cenizas, formación de sedimentos por polimerización o cristalización de moléculas pesadas, cristalización y gelificación a bajas temperaturas, oxidación, polimerización y degradación a ácidos, aldehídos y cetonas, hidrólisis de los ésteres con formación de ácidos libres, acumulación de agua, crecimiento microbiano y formación de lodos asociados, baja volatilidad del combustible.

Para evitar estos inconvenientes se requiere que durante el proceso se logre la conversión completa de triglicéridos a mono-alquilésteres y la remoción completa de glicerina, catalizador y alcohol en exceso. Es necesario eliminar la presencia de cenizas sulfatadas, sodio y potasio, ácidos grasos libres, agua y sedimentos, calcio, magnesio, ésteres del ácido linolénico, ésteres de ácidos poli-insaturados y fósforo. Y se deben controlar propiedades como viscosidad, número de cetano, corrosividad, formación de residuo carbonoso, punto de inflamación y propiedades en frío (26).

#### **4.3.9 Producción mundial de biodiesel**

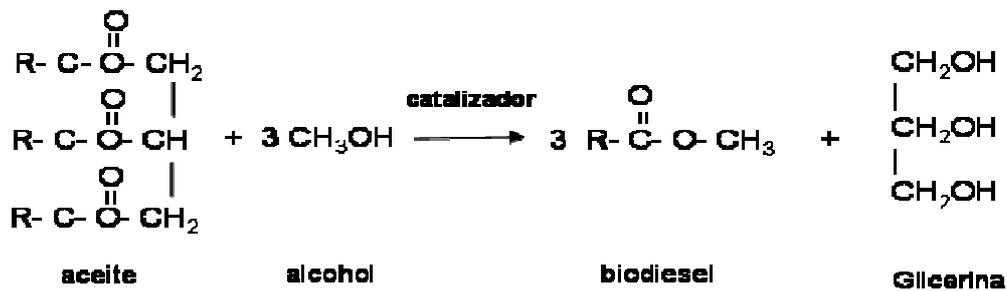
La producción mundial se estima en más de 35 mil millones de litros (4). En Europa, prácticamente cualquier automóvil producido a partir de 1996 es apto para el uso de biodiesel puro. Francia mezcla un 5% de biodiesel como aditivo en los combustibles de todas las estaciones de servicio del país, y en la República Checa, el porcentaje es del 30%. Alemania, Austria y otros países de Europa Central usan biodiesel puro. También es utilizado en minería y en el sector marino. En Alemania se comercializa en más de 350 estaciones de servicio, siendo normal su uso en los cruceros turísticos que navegan sus lagos (1).

En Estados Unidos se venden mezclas de biodiesel, y diversas flotas de transporte terrestre lo utilizan. Su uso se encuentra ampliamente difundido, y su crecimiento durante los últimos años ha sido exponencial. Es el único combustible alternativo que responde a las directivas de la EPA (12).

En América latina el marco legal que regula las actividades del sector privado para la producción de biocombustibles se ha venido desarrollando a lo largo de las últimas décadas para la obtención de productos como alternativa energética. Son notorios los avances logrados por Brasil, Guatemala, Honduras; y en la presente década Perú, Colombia, Costa Rica, Bolivia y Argentina; mientras que otros países de la Región se encuentran en preparación de sus normas legales. Es importante La participación del sector privado para la producción de materias primas y la elaboración de una cantidad determinada de biocombustibles que puedan abastecer la demanda nacional o que orienten su actividad a la exportación, queda para el Estado el oficio de la elaboración de políticas y dentro de estas, la regulación y la promoción de la actividad (13).

#### **4.3.10 Reacción de transesterificación**

La obtención del biodiesel se da por la reacción entre un ácido graso y un alcohol de cadena corta, esta reacción se denomina transesterificación, y ocurre de la siguiente manera:



Donde R corresponde a largas cadenas carbonadas, llamadas cadenas de ácidos grasos. Los productos de esta reacción son el biodiesel (ésteres grasos) y la glicerina, que es un subproducto inevitable (22).

La elección del alcohol está generalmente relacionada con factores económicos y aspectos técnicos del proceso de producción, como la facilidad de separación de ésteres y de glicerina. Los más utilizados son el metanol y el etanol, aunque otros alcoholes como el isopropanol y butílico también pueden ser utilizados. El etanol es menos tóxico que el metanol, sin embargo, tiene que ser usado en su forma pura, totalmente deshidratada, la cual es más cara de obtener. El etanol es solamente 95% puro y el cinco por ciento restante tiene que ser separado por destilación. Adicionalmente, cuando se usa el etanol, el aceite tiene que estar totalmente seco. Ambas condiciones son muy difíciles de conseguir, especialmente con el aceite de frituras (27).

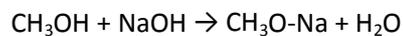
#### 4.3.11 Tecnologías para la producción de biodiesel

El biodiesel se produce mediante la reacción de transesterificación del aceite con un alcohol de cadena corta, siendo el más usado el metanol. Para mejorar la velocidad de reacción de la transesterificación se utiliza un catalizador que puede ser homogéneo o heterogéneo, ácido o básico, también se han usado fluidos supercríticos (metanol o etanol) que evitan el uso de catalizador (28).

- **Catálisis alcalina**

La mayoría de los procesos comunes en la industria usan catalizadores homogéneos alcalinos como el NaOH o el KOH en un reactor agitado de funcionamiento en modo batch. Recientemente se han propuesto algunas mejoras para este proceso, en particular para poder operar en modo continuo, con reducción del tiempo de reacción. Se han usado reactores de mezcla completa, reactores asistidos por microondas, reactores de cavitación y reactores con ultrasonido (4).

El catalizador opera reaccionando con el alcohol de acuerdo:



Donde el CH<sub>3</sub>O-Na es la especie que ataca las fracciones de éster en la molécula de glicerol. El NaOH es más barato y generalmente más fácil de conseguir, también es un poco más fácil de manejar por su forma granular. La reacción normalmente se lleva a cabo a unos 55°C por una hora. El calor adicional ayuda a que la reacción proceda más rápido. Sin embargo, es importante no llevar la reacción a una temperatura tan alta que cause que el metanol se evapore, a menos que la reacción se lleve a cabo en un recipiente seguro y a presión. Muchos procesos industriales se llevan a cabo a temperaturas extremadamente altas en recipientes a presión ya que las reacciones suceden más rápidamente. Como regla general, por cada 10°C se duplica la velocidad de la reacción.

- **Catálisis alcalina no iónica**

Para simplificar las manipulaciones del proceso se han realizado numerosos estudios acerca del desempeño de bases orgánicas. Se han empleado guanidinas, amidinas, piperidina, trietilamina, entre otras. Los resultados han variado de acuerdo a la sustancia utilizada, pero en general, se obtienen conversiones altas y tiempos mínimos de reacción. Sin embargo, este método tiene

como desventajas la dificultad de separación de los productos y un costo elevado del catalizador (29).

- **Catálisis ácida**

La transesterificación es catalizada por ácidos como el sulfónico o el sulfúrico: las conversiones a ésteres son elevadas, superando el 99%, pero la velocidad de reacción es lenta, sobrepasando en algunos casos las tres horas para condiciones normales. Cuando se utiliza un catalizador ácido se requieren condiciones de temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos. Además la separación de la glicerina es difícil de realizar y se requieren materiales de construcción resistentes para los equipos (30).

- **Catálisis heterogénea**

El catalizador heterogéneo posibilita su reutilización, mientras que la concentración del catalizador homogéneo se reduce por la formación de jabones. Se puede separar fácilmente del producto, puede ser regenerado y reutilizado, y permite operar un proceso en continuo. No se crean emulsiones de glicerina disminuyendo mucho el tiempo de separación de las fases por decantación. La selectividad del catalizador disminuye la formación de mono o diglicéridos. Además, la ausencia de estas emulsiones reduce significativamente el lavado del biodiesel para separar la glicerina y el catalizador presente en el mismo, con el consiguiente ahorro en el consumo y depuración de agua. El tiempo de decantado para recuperar los dos productos (glicerina y biodiesel) es esencial para el costo del proceso. La introducción de catalizadores heterogéneos simplifica y disminuye el costo de proceso de purificación de glicerina. A pesar de esto, el método no es viable para grandes volúmenes de producción, pues es muy susceptible a las impurezas, y el catalizador es costoso (31).

Se han utilizado como catalizadores heterogéneos sales de metales alcalino térreos y sales de titanio, Mg/Al, CaO, ZnO, MgO, nanomateriales, zeolitas, resinas sulfónicas, WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>, Na/NaOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

- **Catálisis enzimática**

Las lipasas modifican la estructura de los triglicéridos a través de reacciones de hidrólisis, esterificación y transesterificación. Las enzimas hidrolíticas se han aplicado en las síntesis químicas gracias a su estabilidad, tolerancia a los solventes y a que no requieren de coenzimas. La aplicación de este método aún no es viable comercialmente, debido a que posee cinéticas relativamente lentas, y a que las condiciones de operación son bastante rigurosas. Son resistentes al metanol la *Candida rugosa*, *Candida antarctica*, *Penicillium*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas cepacia*. Se han utilizado como catalizadores alcoholes monohídricos catalizados por lipasas inmovilizadas sobre soportes granulares como zeolita (31).

- **Procesos supercríticos**

En este método los reactivos se llevan a las condiciones de fluido supercrítico (a una presión y temperatura superiores a su presión y temperatura críticas) del alcohol utilizado, y se cargan al reactor. La cinética es 10 veces más rápida que el mejor de los anteriores casos, con conversiones superiores. El método supercrítico elimina la necesidad del uso de catalizadores base y otros problemas, como la formación de subproductos no deseados y la pérdida de rendimiento. Posee como desventajas las condiciones extremas de operación (350°C y 30 MPa), que lo hacen inviable para la producción a gran escala (32).

- **Extracción reactiva**

La extracción reactiva o reacción extractiva aprovecha la incompatibilidad termodinámica que existe en un sistema para promover el avance de una reacción en equilibrio, utilizando una sola unidad para la reacción y la separación. La inmiscibilidad de estas fases se puede dar naturalmente dentro del sistema de reacción o la segunda fase puede ser introducida con la adición de solventes, logrando la separación selectiva de compuestos intermedios o productos, previniendo su posterior reacción o la inhibición de biomasa en sistemas biológicos, consiguiendo así un mayor rendimiento. Se usan acetatos de etilo y metilo como agentes de extracción para la obtención de ésteres de ácidos grasos utilizando lipasas como catalizador. Presenta desventajas como la selección y adición de un solvente que logre extraer selectivamente el producto de interés (33).

- **Reactores de membrana**

Un reactor de membrana es una combinación de un reactor y una membrana en línea, para la separación. La membrana obstaculiza el paso de uno o varios de los componentes, a la vez que es selectivamente permeable a otros, siendo útil en reacciones que se encuentran limitadas por el equilibrio, desplazando éste hacia la derecha, lográndose así altas conversiones. Estos reactores pueden ser utilizados en reacciones de hidrólisis catalizadas por lipasas (34).

- **Destilación Reactiva**

La destilación reactiva es un proceso combinado, en el cual la reacción química y la destilación son llevadas a cabo en una sola unidad de proceso. Ofrece distintas ventajas sobre la configuración convencional, ya que se reducen costos de capital y operación, además de aumentar la conversión, selectividad y transferencia de masa. La destilación reactiva es utilizada principalmente en reacciones limitadas por el equilibrio, tales como, la transesterificación, donde

la conversión puede ser incrementada más allá de la conversión de equilibrio debido a la continua remoción de los productos en la zona de reacción (35).

#### **4.3.12 Purificación del biodiesel**

Los productos obtenidos de la reacción de transesterificación se encuentran contaminados con otros compuestos. Estos compuestos pueden ser los triglicéridos que no reaccionaron, alcohol, catalizador, mono y diglicéridos, jabones y glicerol. Por esta razón, después de la transesterificación es necesario realizar una o más etapas de purificación (26).

- **Decantación**

Los ésteres tienen densidad del orden de  $0,83 \text{ g/cm}^3$ , mientras que el glicerol tiene una densidad de orden de  $1,05 \text{ g/cm}^3$  o más. La densidad de la fase de glicerina depende de la cantidad de alcohol, agua y catalizador que contenga. Esta diferencia de densidad es suficiente para que las fases puedan ser separadas por gravedad en un decantador. Como alternativa a la decantación puede ser utilizada una centrífuga para separar estos dos compuestos, siendo esta operación más rápida pero requiere de una mayor inversión en equipos; o la utilización de aditivos que promuevan la aglomeración de moléculas de glicerol tornando el proceso más rápido. La glicerina arrastra consigo la mayor parte del jabón, catalizador y alcohol (22).

Si la agitación se prolonga durante todo el tiempo de reacción, la glicerina se dispersará en el medio en partículas más pequeñas. Esta dispersión acarreará un mayor tiempo de decantación de las partículas en la fase de glicerina. Otro factor importante es el pH del medio de reacción; cuanto más cerca al neutro, más rápida será la separación de fases. Ésta es una de las razones por las cuales se debe minimizar la cantidad de catalizador utilizado. La presencia de alcohol en una o ambas fases también afectaría el proceso de separación, debido a que el alcohol es miscible en ambas fases, tornando el éster soluble en glicerol y viceversa.

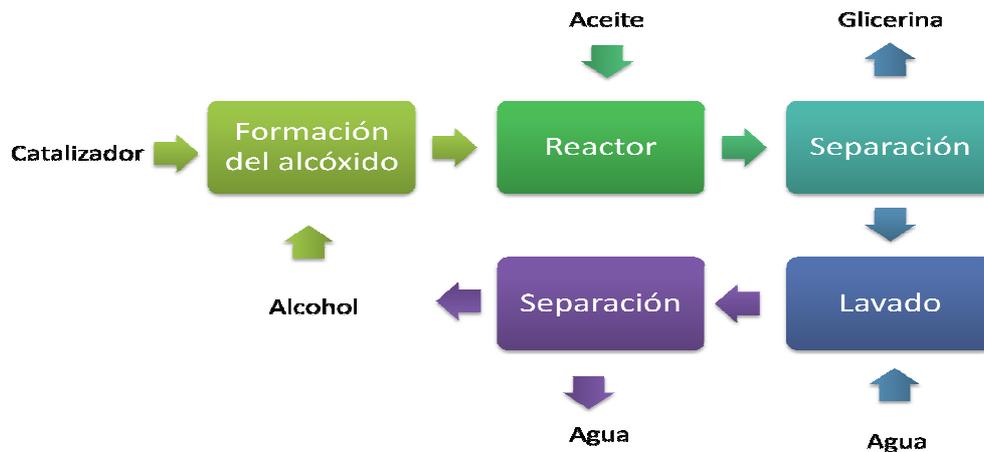
- **Lavado**

Los ésteres deben ser lavados para remover vestigios de catalizador, de jabón y glicerol. El lavado se realiza por aspersión de agua templada (50 a 60 °C). La aspersión debe ser tal, que no promueva la agitación para prevenir la formación de emulsión. La utilización de agua levemente ácida elimina contaminaciones de calcio y magnesio, además de trazas de hierro y cobre, que disminuyen la estabilidad del combustible. El lavado también proporciona un medio para la adición de una solución ácida con el objetivo de neutralizar el catalizador remanente en la mezcla, formando una sal que es eliminada conjuntamente con el agua de lavado. La separación de fases entre el éster y el agua ocurre rápidamente y de forma bien definida (22).

- **Secado y Recuperación del alcohol**

El biodiesel sufre un proceso de secado antes de ser enviado para almacenamiento. En algunos sistemas industriales, se procede aún a la destilación del biodiesel con vista a la obtención de un producto de mayor pureza. En las reacciones de transesterificación se utiliza un exceso de alcohol de 100% para conducir la reacción a elevados niveles de rendimientos. Este exceso puede ser recuperado para su posterior utilización por medio de destilación flash.

La Figura 4.8 muestra un esquema que describe el proceso más generalizado para la obtención de biodiesel.



**Figura 4.8 Proceso de obtención de biodiesel**

#### 4.3.13 Aprovechamiento de la glicerina

En la síntesis del biodiesel, se forman ésteres en una proporción aproximada del 90% más un 10% de glicerina. La glicerina es eliminada en el proceso cuando se procede al lavado con agua. Se emplea en la fabricación, conservación, ablandamiento y humectación de gran cantidad de productos, éstos pueden ser resinas alquídicas, celofán, tabaco, explosivos (nitroglicerina), fármacos y cosméticos, espumas de uretano, alimentos y bebidas, etc. La glicerina se enfrenta a un reto de investigación y desarrollo de cara a tener una salida para la misma en caso que como es previsible su producción (como subproducto de la reacción de transesterificación) aumente significativamente en los próximos años. Por ello, se deben buscar nuevas salidas y aplicaciones al producto final o bien encontrar nuevas aplicaciones en las que ésta actúe como materia prima química. Se ha estudiado la obtención de acetato de glicerina y la producción de biogás (36).

#### 4.3.14 El biodiesel en Colombia

La historia del biodiesel en Colombia inicia en el año 2004 con la expedición de la Ley 939 que permite su mezcla con el diesel de petróleo y lo exime de impuestos. En el año 2005 mediante la Resolución 1289 se definen sus requisitos de calidad técnica y ambiental y la proporción de la

mezclas con el diesel. A partir de ahí otras leyes han regulado la estructura de precios y la comercialización del biodiesel en Colombia.

Existen siete plantas productoras de biodiesel que producen 50.000 galones por día de biodiesel, para lo cual se utilizan cerca de 14.000 hectáreas de palma de aceite, ubicadas en los departamentos del Atlántico, Cesar, Magdalena, Cundinamarca, Meta y Santander como se muestran en la Figura 4.9. Esta figura también muestra las mezclas que se están usando actualmente en el territorio nacional.

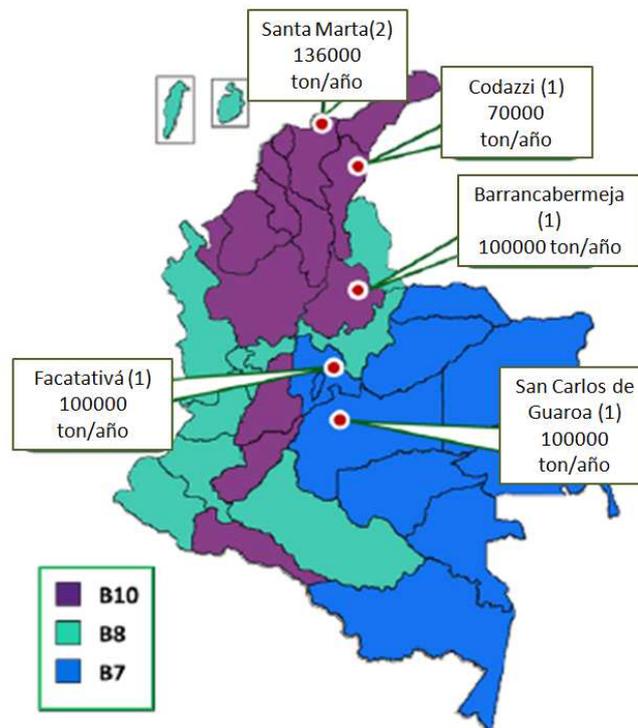


Figura 4.9 Plantas de biodiesel en Colombia. Fuente: Fedecombustibles, 2011

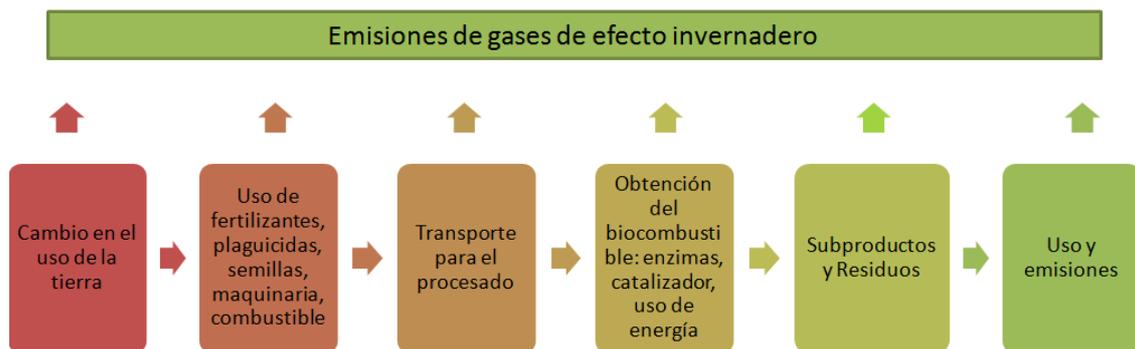
#### 4.4 Impacto ambiental de los biocombustibles

Los biocombustibles son solamente una de las alternativas existentes para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Otras opciones podrían resultar ser más rentables como, por

ejemplo, diferentes formas de energía renovable, un aumento de la eficiencia y la conservación de la energía. Los balances de gases de efecto invernadero no son positivos para todas las materias primas.

En lo que se refiere al cambio climático, las inversiones deberían dirigirse hacia los cultivos que presentan los mayores balances de gases de efecto invernadero positivos con los costos sociales y medioambientales más reducidos. Las repercusiones medioambientales pueden ser ocasionadas en todas las fases de la producción y procesamiento de materias primas para biocombustibles, pero tienden a dominar los procesos relacionados con el cambio de uso de la tierra y la intensificación.

Realizando un análisis del ciclo de vida de los biocombustibles, se encuentra que durante todo su proceso de obtención y posterior uso hay generación de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales como la contaminación de ecosistemas por el uso de pesticidas, generación de residuos, cambio en el uso de la tierra, entre otros como los problemas por la seguridad alimentaria. Lo anterior se ilustra en la Figura 4.10 (37).



**Figura 4.10. Impacto ambiental de los biocombustibles**

#### 4.5 Antecedentes y estado del arte

Las investigaciones en el área de los biocombustibles se han incrementado en los últimos años. Las figuras siguientes muestran cómo en los últimos cinco años el desarrollo de investigaciones se ha desencadenado de manera vertiginosa. En la base de datos de Scienedirect, se encuentran registradas más de 7000 publicaciones sobre biodiesel y casi 4000 acerca del bioetanol.

Las temáticas relacionadas con el etanol incluyen los diferentes tipos de materia prima usada, procesos de sacarificación y fermentación y el desempeño en la generación de emisiones. En el área del biodiesel se incluyen además de las anteriores, la influencia del tipo de materia prima en las propiedades del biodiesel y sus mezclas, sobre todo la estabilidad térmica y oxidativa que son las de mayor interés.

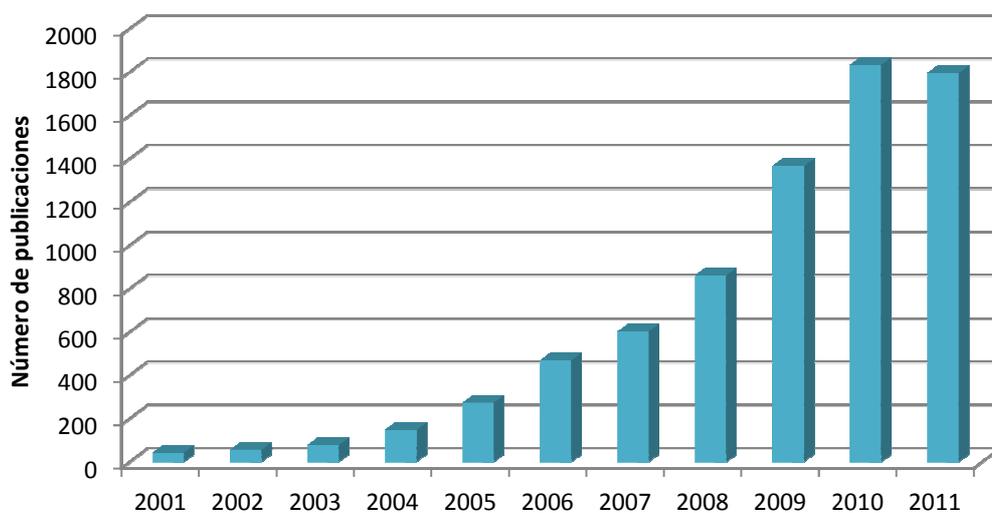
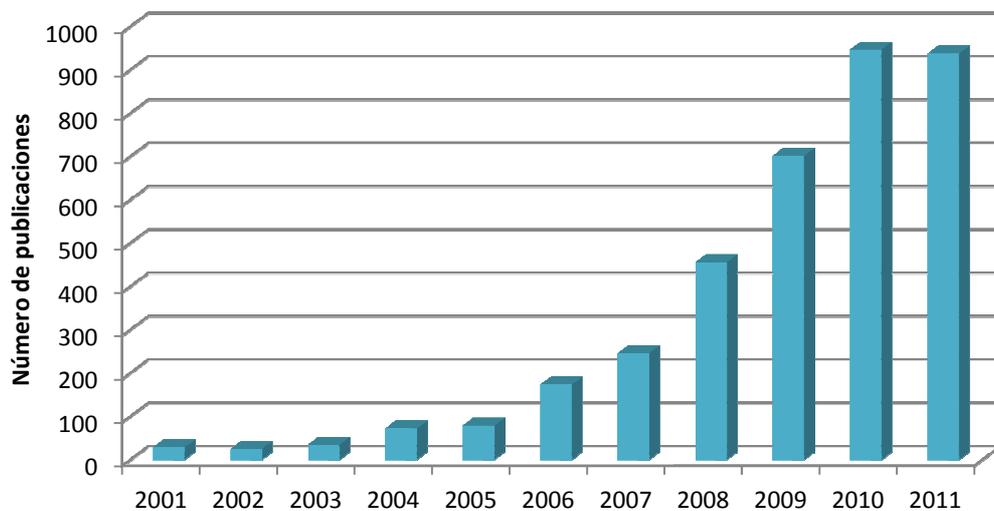


Figura 4.11. Publicaciones anuales sobre bioetanol en Scienedirect<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Las publicaciones del 2011 sólo se incluyen hasta el mes de Junio.



**Figura 4.12 Publicaciones anuales sobre biodiesel en Sciencedirect<sup>2</sup>**

Con relación a la estimación de propiedades de los biocombustibles, se han desarrollado algunas investigaciones en las cuales se han propuesto correlaciones para estimar algunas propiedades en función de la temperatura, o la composición del biocombustible.

Benjumea et al. (38) determinaron experimentalmente las propiedades del biodiesel de palma y usaron la regla de las mezclas para predecir la densidad, poder calorífico, tres puntos de la curva de destilación (T10, T50 y T90), punto de nube y el índice de cetano, y la regla de las mezclas de Arrhenius para la viscosidad.

Demirbas (15) obtuvo correlaciones empíricas para estimar la relación matemática entre el valor calorífico superior y la viscosidad, la densidad y el punto de flash en varios tipos de biodiesel.

Allen et al. (39) correlacionaron la viscosidad de diferentes tipos de biodiesel como una función de la composición de ésteres de ácidos grasos. En un trabajo similar, Fassinou et al. (40) usaron la

<sup>2</sup> Ibidem

composición de ácidos grasos como un medio para estimar el poder calorífico superior del biodiesel.

Anand et al. (41) desarrollaron una metodología para estimar el punto de ebullición, la temperatura crítica, el factor acéntrico, la presión de vapor, el calor latente de vaporización, la capacidad calorífica y la conductividad térmica del biodiesel a partir de su composición y estructura química.

Imahara et al. (42) estimaron el punto de nube de biodiesel de diferentes tipos en función de su composición de ésteres de ácidos grasos.

Joshi et al. (43) obtuvieron una ecuación empírica para calcular la viscosidad dinámica en función de la la temperatura y la fracción en volumen de biodiesel en la mezcla.

Krisnangkura et al. (44) propusieron un modelo termodinámico para la determinación de viscosidades cinemáticas de ésteres de ácidos grasos saturados de metilo de distintas longitudes de cadena diferentes a temperatura.

Lapuerta et al. (45) correlacionaron el número de cetano como función de la insaturación de los ésteres de ácidos grasos. Posteriormente en otro trabajo, Lapuerta et al. (46) compilaron la densidad de ésteres metílicos y etílicos publicados en la literatura, y propusieron ecuaciones para predecir la densidad del biodiesel en función de su longitud de la cadena y el grado de saturación. Definieron un término llamado índice de cetano del biodiesel, que predice con gran precisión el número de cetano del biodiesel.

García et al. (47) simularon en un software el proceso convencional de producción de biodiesel con el fin de predecir de 13 de los 25 parámetros incluidos en la norma EN-14214, tales como densidad, viscosidad, capacidad calorífica entre otros.

Ramos et al. (48) estudiaron la influencia de la composición de la materia prima sobre la calidad del biodiesel. Algunos parámetros críticos, tales como estabilidad a la oxidación, número de cetano, índice de yodo se correlacionaron con la composición de ésteres metílicos del biodiesel, de acuerdo a dos parámetros: la longitud de la cadena y el grado de insaturación.

Perdomo et al. (49) modelaron las propiedades termofísicas de cadenas de metilésteres de cadena larga usando la metodología SAFT-VR, la cual consiste en una asociación estadística de la teoría de fluidos con rango variable. Se obtuvieron buenas predicciones para la capacidad calorífica del biodiesel.

Tesfa et al. (50) fueron formulados nuevos modelos de predicción para la densidad y la viscosidad del biodiesel y sus efectos en el sistema de suministro de combustible en motores de combustión interna.

Ramírez et al. (51) propusieron una correlación empírica para estimar la densidad y tres correlaciones empíricas para predecir la viscosidad cinemática de mezclas de biodiesel en función de la temperatura y el volumen de biodiesel en la mezcla.

Cheenkachorn (52) usó modelos estadísticos y redes neuronales artificiales para predecir propiedades del biodiesel como viscosidad, poder calorífico superior e índice de cetano en función de la composición de ésteres de ácidos grasos. Baroutian et al. (53) también usaron redes neuronales artificiales para predecir la densidad del biodiesel de palma.

Clements (54) predijo propiedades del biodiesel como densidad, viscosidad, número de cetano y poder calorífico superior usando algunas reglas para las mezclas y a partir de la composición de ésteres de ácidos grasos presentes.

Montoya (55) predijo las propiedades críticas y la temperatura de ebullición del biodiesel usando el método de Constantinou- Gani. La presión de vapor la estimó usando el método de contribución de grupos. Otra investigación en la que se usó este método fue la de Sales-Cruz et al. (56) quienes predijeron las propiedades críticas, densidad y viscosidad de ácidos grasos, triglicéridos y metilésteres.

Atadashi et al (24) muestra una revisión de las propiedades que debe poseer un biodiesel de alta calidad para que su aplicación en motores diesel sea óptima. Muchos investigadores han estudiado el desempeño del biodiesel, por ejemplo, Demirbas (15) revisó los parámetros de desempeño del biodiesel tales como eficiencia térmica al freno, torque, consumo de combustible y salida de potencia. Reporta que el oxígeno mejora la combustión, pero incrementa el consumo de combustible. Encontró que la eficiencia térmica al freno mejora con el uso de biodiesel.

Sobre las mezclas de etanol se han formulado menor número de investigaciones debido a que son más conocidas que las del biodiesel.

Ferrando et al. (57) determinaron la densidad y la presión de burbuja de las mezclas etanol – gasolina experimentalmente y usando el modelo de Montecarlo a varias temperaturas y contenidos de etanol en la mezcla.

Pumphrey et al. (58) usaron un método simple para predecir las presiones de vapor de las mezclas de alcohol con gasolina. Se encontraron los coeficientes de dilución infinita y los coeficientes de actividad para encontrar las constantes en la ecuación de Wilson, y predecir la presión de vapor.

El impacto ambiental también ha sido modelado, Török (59) realizó una estimación teórica del impacto ambiental generado por diferentes mezclas etanol – gasolina y biodiesel – diesel basado en la producción de CO<sub>2</sub> y el oxígeno requerido para la combustión completa.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Desarrollo de los métodos analíticos para calcular propiedades termofísicas de las mezclas de biocombustibles

Se seleccionaron las propiedades mostradas en la Tabla 5.1. Se identificaron las ecuaciones empíricas aplicables para cada propiedad y las variables requeridas para su cálculo. Se estimaron para diferentes proporciones de biocombustible en la mezcla. Se validaron los resultados comparándolos con datos reales conocidos y reportados en la literatura científica.

**Tabla 5.1 Propiedades y parámetros estimados a las mezclas de biocombustibles**

Propiedad	Bioetanol - Gasolina	Biodiesel – Diesel
Densidad	X	X
Gravedad API	X	X
Análisis elemental	X	X
Relación C/H	X	X
Aire teórico	X	X
Viscosidad dinámica	X	X
Poder calorífico superior	X	X
Punto de nube		X
Número de Prandtl	X	
Número de cetano		X
Conductividad térmica	X	X
Capacidad calorífica	X	
Temperatura de inflamación	X	X

Debido a que el estado líquido no es tan conocido como el estado gaseoso, no existe un tratamiento simple y uniforme para la multiplicidad de fenómenos asociativos y coligativos que ocurren en las mezclas líquidas. La variación de las propiedades físicas de una mezcla con la composición aporta información acerca de las fuerzas intermoleculares existentes. En una

disolución ideal, las propiedades físicas pueden calcularse a partir de las propiedades de los componentes puros:

$$\varphi_m = \sum \varphi_i x_i \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde  $\varphi_i$  es la propiedad de la mezcla ideal,  $x_i$  la fracción molar del componente  $i$  y  $\varphi_i$  la propiedad del componente  $i$  puro. La sumatoria está extendida a todos los componentes de la disolución.

La mayoría de las mezclas líquidas no presentan comportamiento ideal y no se puede usar la Ecuación 1, por lo que se definen otras ecuaciones que permiten una aproximación al estado real. Algunas de estas ecuaciones son basadas en estudios teóricos, aproximaciones del estado ideal, o correlaciones empíricas. A continuación se describen algunas de las aproximaciones usadas para la predicción de las propiedades de los biocombustibles y sus mezclas en varias proporciones.

### 5.1.1 Densidad

La densidad es una propiedad requerida para el cálculo de otras propiedades, sin embargo, para mezclas líquidas no se puede calcular como un simple promedio de las densidades de los componentes.

- **Densidad promedio molar**

Este método se basa en la densidad de los componentes:

$$\rho_m = \sum \rho_i x_i \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde  $\rho_m$  es la densidad de la mezcla,  $\rho_i$  es la densidad de cada componente y  $x_i$  la fracción molar.

- **Ecuación de Rackett:**

Este método se basa en las propiedades críticas de las sustancias.

$$\rho^b = \frac{P_c}{RT_c Z_{RA} \left( \frac{1+(1-T_r)^2}{7} \right)} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Donde  $\rho^b$  es la densidad molar de la mezcla en el punto de ebullición,  $P_c$  es la presión crítica de la mezcla,  $T_c$  es la temperatura crítica de la mezcla,  $T_r$  es la temperatura reducida de la mezcla,  $Z_{RA}$  es el valor de la constante de Rackett, y  $R$  es la constante universal de los gases ideales.

La presión crítica de la mezcla puede estimarse como:

$$P_c = \sum_{i=1}^n P_{ci} x_i \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde  $P_{ci}$  es la presión crítica de cada componente y  $x_i$  la fracción molar. De igual forma se pueden calcular la temperatura crítica y la constante de Rackett:

$$T_c = \sum_{i=1}^n T_{ci} x_i \quad \text{Ecuación 5.5}$$

$$Z_{RA} = \sum_{i=1}^n Z_{RAi} x_i \quad \text{Ecuación 5.6}$$

### 5.1.2 Gravedad API

La gravedad API es una medida del peso de un combustible en relación al agua. Si el combustible es más liviano que el agua su grado API es mayor de 10. La gravedad API se puede calcular a partir de los datos de densidad relativa, de acuerdo a la expresión:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho_{rel}} - 131,5 \quad \text{Ecuación 5.7}$$

### 5.1.3 Composición elemental

La mayoría de las propiedades físicas y térmicas de las sustancias son función de su composición. Para cada una de las sustancias puras que conforman las mezclas se determinó el análisis elemental a partir de su fórmula molecular y su proporción en la mezcla.

#### 5.1.4 Relación C/H

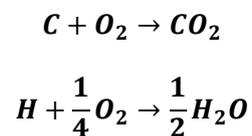
La relación C/H de un combustible es muy importante a la hora de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en el origen. Una mayor cantidad de carbono implica mayor producción de dióxido de carbono, pero adicionalmente está relacionada con un mayor poder calorífico. Por otro lado, la presencia de hidrógeno en el combustible genera agua en forma de vapor que va a hacer que disminuya el poder calorífico durante la combustión, ya que el agua absorberá parte del calor generado.

La relación C/H es deseable entre 6-7, valores superiores a 7 provocarán la coquización del combustible durante la combustión, lo cual disminuye la eficiencia de la combustión en el quemador y en los inyectores.

A partir de los datos obtenidos para el análisis elemental de las mezclas, se calculó la relación C/H como el cociente entre el porcentaje másico de carbono y el porcentaje másico de hidrógeno.

#### 5.1.5 Aire teórico

El aire teórico es calculado a partir del oxígeno teórico, definido como el oxígeno necesario para efectuar la combustión completa del combustible, suponiendo que todo el carbono del combustible se oxida para formar CO<sub>2</sub> y todo el hidrógeno se oxida para formar H<sub>2</sub>O. Este cálculo debe descontar la cantidad de oxígeno presente en el combustible, que en el caso de los biocombustibles es importante. El cálculo se basa en las siguientes reacciones químicas:



Realizando el balance estequiométrico de estas ecuaciones se determina la cantidad de oxígeno requerido conocido el porcentaje de C y de H en cada una de las mezclas.

### 5.1.6 Viscosidad

Muchos estudios se han realizado para desarrollar modelos de predicción de la viscosidad de mezclas líquidas, sin embargo algunos de ellos sólo son aplicables para ciertas mezclas o no son muy confiables. En el caso de mezclas entre especies que no interaccionan entre sí, como es el caso de los hidrocarburos, se puede asumir que la viscosidad es aditiva. Entonces se podrá calcular la viscosidad de la mezcla mediante cualquier regla ideal de aditividad de propiedades. Si las especies presentes interactúan fuertemente entre sí, es necesario emplear parámetros de interacción obtenidos a partir de datos experimentales que corrijan las reglas ideales para tomar en cuenta la no idealidad, o tomar alguna otra medida correctiva (60).

**Tabla 5.2. Correlaciones para estimar la viscosidad de mezclas líquidas (65)**

Modelo	Ecuación	Número
Lineal	$\mu_m = \sum x_i \mu_i$	<b>Ecuación 5.8</b>
Arrhenius, logarítmico	$\log \mu_m = \sum x_i \log \mu_i$	<b>Ecuación 5.9</b>
Bingham	$\frac{1}{\mu_m} = \sum \frac{x_i}{\mu_i}$	<b>Ecuación 5.10</b>
Kendall y Monroe	$(\mu_m)^{1/3} = \sum x_i (\mu_i)^{1/3}$	<b>Ecuación 5.11</b>

Las reglas de las mezclas puras son fáciles de aplicar debido a que sólo requieren la viscosidad de los componentes y la composición de las mezclas en términos de fracciones de volumen o peso, tales como la de Arrhenius (61), Bingham (62), Kendall y Monroe (63), Reid et al. (64) que se muestran en la Tabla 5.2.

Donde  $\mu_{mezcla}$  es la viscosidad de la mezcla (kg/m s),  $\mu_i$  es la viscosidad de cada compuesto (kg/m\*s),  $x_i$  es la fracción molar del componente i la mezcla y  $y_i$  es la fracción másica del componente i en la mezcla.

Para el biodiesel, Clements (54) usó la siguiente expresión a partir de las viscosidades de los componentes y sus fracciones molares:

$$\ln(\mu_{mezcla}) = \sum x_i \sqrt[3]{\ln(\mu_i)} \quad \text{Ecuación 5.12}$$

La regla Grunberg-Nissan (1949) para la predicción de la viscosidad de las mezclas líquidas es ampliamente utilizada:

$$\ln \mu_m = \sum_i^n x_i \ln \mu_i + \sum_i^n \sum_j^n x_i x_j G_{ij} \quad \text{Ecuación 5.13}$$

Donde  $\mu_m$  es la viscosidad absoluta de la mezcla,  $\mu_i$  es la viscosidad absoluta de cada componente,  $x_i$  and  $x_j$  son las fracciones molares de los componentes  $i$  y  $j$ ,  $G_{ij}$  es el parámetro de interacción entre cada pareja de componentes. ( $G_{ij} = 0$ , para  $i = j$ ), y  $n$  es el número de componentes.

Cuando los componentes de una mezcla química tienen estructura similar, se espera que no interactúen entre sí y en consecuencia, el parámetro de interacción se puede despreciar. Las mezclas biodiesel-diesel puede suponerse que se comportan de esta manera debido a que ambos líquidos son de naturaleza no polar, y miscibles por completo, de manera que cuando se mezclan, sus volúmenes son prácticamente aditivos. Los metilésteres presentes en el biodiesel pueden considerarse de la misma forma.

La viscosidad de los metilésteres y la mezcla, a 40°C, se puede calcular de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Allen en función de los pesos moleculares (66):

$$\mu = 1.05 \times 10^{-4} M^2 - 0.024 M + 2.15 \quad \text{Ecuación 5.14}$$

Cheenkachorn (52) sugiere un modelo basándose en el hecho de que sólo los ácidos grasos insaturados como el ácido oleico, ácido linoleico, ácido linolénico y el ácido erúcico influyen en la viscosidad del biodiesel. Esto se debe a la presencia de los dobles enlaces y la longitud de la cadena de los ácidos. En general, la viscosidad aumenta a medida que la longitud de la cadena de

ácidos aumenta y disminuye a medida que aumenta el número de dobles enlaces. El modelo de regresión lineal estimado con la metodología de redes neuronales, expresando la viscosidad en cSt es el siguiente:

$$\mu = 1,82 - 55,3(C18:3)^2 - 10,3(C18:1)^2 + 5,11(2C18:1) + 0,162(4C18:2) + 4,95(C22:1)$$

**Ecuación 5.15**

Sin embargo, para las mezclas etanol – gasolina, se han propuesto otras metodologías. Burgos (67) predijo las viscosidades de mezclas de alcoholes usando la metodología de Mc Allister que consiste en sumar la contribución de los grupos CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub> y OH presentes en la mezcla binaria.

La ecuación propuesta por Mc Allister es:

$$\begin{aligned} \ln v = & x_1^3 \ln v_1 + 3x_1^2x_2 \ln v_{12} + 3x_1x_2^2 \ln v_{21} + x_2^3 \ln v_2 - \ln \left( x_1 + x_2 \frac{M_2}{M_1} \right) + 3x_1^2x_2 \ln \left[ \frac{1}{3} \left( 2 + \frac{M_2}{M_1} \right) \right] \\ & + 3x_1x_2^2 \ln \left[ \frac{1}{3} \left( 1 + 2 \frac{M_2}{M_1} \right) \right] + x_2^3 \ln \left( \frac{M_2}{M_1} \right) \end{aligned}$$

**Ecuación 5.16**

Donde *M* es el peso molecular de cada componente, *v* es la viscosidad cinemática y *v*<sub>12</sub> y *v*<sub>21</sub> son parámetros de ajuste calculados a partir de datos experimentales.

**5.1.7 Poder calorífico superior**

El poder calorífico superior (PCS) se define suponiendo que todos los reactivos de la combustión (combustible y aire) son tomados a 0°C y los productos (gases de combustión) son llevados también a 0°C después de la combustión, por lo que el vapor de agua se encontrará totalmente condensado. El vapor de agua puede provenir de la humedad propia del combustible y del agua formada por la combustión del hidrógeno.

Numerosas correlaciones para el cálculo del PCS en función de la composición elemental se encuentran disponibles en la literatura. Channiwala y Parikh (68) reúnen modelos de diferentes

autores, la mayoría de ellos se han derivado de los estudios de diferentes tipos de carbón, y otros combustibles de reciente interés como la biomasa y los biocombustibles. Algunos de estos modelos se presentan a continuación en la Tabla 5.3, el PCS se expresa en MJ/kg y las composiciones en porcentaje másico.

**Tabla 5.3. Correlaciones para el cálculo del calor específico superior (68)**

Modelo	Correlación, PCS (MJ/kg)	Ecuación
Dulong, 1880	$PCS=0,3383C+1,443(H-O/8)+0,0942S$	Ecuación 5.17
Strache y Lant, 1924	$PCS=0,3406C+1,4324H-0,1532O+0,1047S$	Ecuación 5.18
Vondreck, 1927	$PCS=(0,373-000026C)C+1,444(H-(1/10)O)+0,1047S$	Ecuación 5.19
D'Huart, 1930	$PCS=0,3391C+1,4337H+0,0931S-0,1273 O$	Ecuación 5.20
Schuster, 1931	$PCS=(1,0632+1,486 \times 10^{-3} O)(C/3+H-(O-S)/8)$	Ecuación 5.21
Grummel y Davis, 1933	$PCS=(0,0152H+0,9875)(C/3)+H-((O-S)/8)$	Ecuación 5.22
Seyler, 1938	$PCS=0,519C+1,625H+0,001O^2-17,87$	Ecuación 5.23
Gumz, 1938	$PCS=0,3403C+1,2432H+0,0628N+0,1909S-0,0984 O$	Ecuación 5.24
Sumegi, 1939	$PCS=0,3391(C-0,75(O/2))+1,444(H-0,125(O/2))+0,1047S$	Ecuación 5.25
Mott y Spooner, 1940	$PCS=0,3361C+1,419H-0,1453 O+0,0942S$	Ecuación 5.26
Boie, 1953	$PCS=0,3517C+1,1626H+0,1047S-0,111 O$	Ecuación 5.27
Dulong Berthelot	$PCS=0,3414C+1,4445H-1/8(N+O-1)+0,093S$	Ecuación 5.28
IGT, 1978	$PCS=0,341C+1,323H+0,0685-0,0153 A -0,1194(O+N)$	Ecuación 5.29
Jenkins, 1980	$PCS=0,4791C+0,6676H+0,0589 O-1,2077S-8,42$	Ecuación 5.30
Jenkins, 1985	$PCS=-0,763+0,301C+0,525H+0,0064 O$	Ecuación 5.31
Grabosky y Bain, 1981	$PCS=0,328C + 1,4306H-0,0237N+0,0929S-(1-A/100)(40,11 H/C)+0,3466$	Ecuación 5.32
Beckman et al., 1990	$PCS=0,352C+0,944H+0,105(S-O)$	Ecuación 5.33
Wilson, 1975	$PCS=0,352Co+1,507H-0,1384 O-0,1485Ci+0,09263S+0,02419N$	Ecuación 5.34
Chang, 1979	$PCS=35,8368+0,7523H-0,2674S-0,4654 O-0,3814Cl-0,2802N$	Ecuación 5.35
Niessen, 1995	$PCS=0,2322C+0,7655H-0,072 O-0,0419N+0,0698S+0,0262Cl+0,1814P$	Ecuación 5.36

Channiwala y Parikh, después de analizar y evaluar los modelos anteriores propusieron el siguiente modelo unificado:

$$PCS = 0,3491 C+1,1783 H+0,1005 S-0,1034 O -0,0151 N-0,0211 A$$

Ecuación 5.37

Donde  $C$  es el porcentaje en peso de carbono,  $H$  es el porcentaje en peso de hidrógeno,  $O$  es el porcentaje en peso de oxígeno,  $S$  es el porcentaje en peso de azufre,  $N$  es el porcentaje en peso de nitrógeno y  $A$  corresponde al porcentaje de cenizas.

Demirbas (15) propone para el biodiesel una expresión del poder calorífico superior en función de la viscosidad:

$$PCS = 0,4625 \nu + 39,450 \quad \text{Ecuación 5.38}$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática expresada en cSt y el poder calorífico en MJ/kg.

### 5.1.8 Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. La conductividad térmica de los líquidos puros por debajo del punto de ebullición está en su mayoría en el entorno desde 0.1 a 0.17 W/(m K). Por ser un intervalo muy estrecho resulta más fácil encontrar relaciones empíricas que permitan calcularla. Dos métodos conocidos para ello son el de Latini y el de Sato-Riedel (60). El error del método de Latini varía pero normalmente es menor del 10%, y no es aplicable en compuestos polares. El método de Sato y Riedel, también llamado del punto de ebullición estima la conductividad térmica en función de la temperatura reducida ( $T_r$ ), la temperatura reducida en el punto de ebullición ( $T_{rb}$ ) y el peso molecular.

$$k = \frac{1,11}{\sqrt{M}} \frac{3+20(1-T_r)^{2/3}}{20(1-T_{rb})^{2/3}} \quad \text{Ecuación 5.39}$$

La conductividad térmica de las mezclas líquidas es evaluada de acuerdo al método de Li (69):

$$k_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi_i \phi_j \lambda_{ij} \quad \text{Ecuación 5.40}$$

$\lambda_{ij}$  se calcula como:

$$\lambda_{ij} = 2(k_i^{-1} + k_j^{-1})^{-1} \quad \text{Ecuación 5.41}$$

$$\phi_i = \frac{x_i V_i}{\sum_{j=1}^n x_j V_j} \quad \text{Ecuación 5.42}$$

Donde  $k_i$  y  $k_j$  son las conductividades del par de componentes,  $x_i$  y  $x_j$  son las fracciones molares y  $V_i$  y  $V_j$  los volúmenes molares de cada componente.

### 5.1.9 Número de cetano

El número de cetano mide la calidad de ignición de un combustible diesel. Un alto número de cetano indica un menor retraso en la ignición, ayuda a un mejor arranque del motor y minimiza la emisión de humo al lograr una combustión más suave. El índice de cetano es más favorable en el biodiesel y esta ventaja se hace mayor en metilésteres con mayor porcentaje de ácidos saturados.

Cheenkachorn propone la siguiente expresión para estimar el número de cetano del biodiesel en función de su contenido de metilésteres (52):

$$CN = 33.6 + 0.539 (C18:0) + 0.303(C18:1) + 0.0878 (C18:2) + 0,233 (C22:1) \quad \text{Ecuación 5.43}$$

### 5.1.10 Punto de nube

El punto de nube es un indicador de la temperatura más baja de su utilidad para aplicaciones seguras. Se define como la temperatura a la cual aparecen los primeros cristales en el cuerpo del líquido combustible. Por esto, esta propiedad es importante para la operabilidad del combustible a bajas temperaturas, demostrando su resistencia a las condiciones adversas de trabajo.

Imahara et al. (42) basándose en los estudios de Coutinho propone la siguiente correlación en función de las fracciones másicas de metilésteres:

$$P. N. (K) = 299.6 y_{C16:0} + 378.5 y_{C18:0} + 266.5 y_{C18:1} + 265.2 y_{C18:2} \quad \text{Ecuación 5.44}$$

Esta ecuación puede aplicarse para el biodiesel de palma despreciando la influencia del metil miristato, cuya composición es aproximadamente del 1%.

Otra correlación es la propuesta por Sarin et al. (70) que sugiere que el punto de nube es función del contenido de metilésteres insaturados:

$$P.N.(C) = -0.576X + 48.255 \quad \text{Ecuación 5.45}$$

Donde  $X$  es el porcentaje másico de metilésteres insaturados, y es válida para  $X \leq 84\%$ . Sarin et al. también proponen una correlación en función del contenido de metil palmitato:

$$P.N.(C) = 0.526X_{MP} - 4.992 \quad \text{Ecuación 5.46}$$

Donde  $X_{MP}$  es el porcentaje másico de metil palmitato, que debe ser  $X \leq 45\%$ .

Joshi et al. (43) basados en varias mediciones, proponen la siguiente correlación, en función de la fracción volumétrica de biodiesel en la mezcla:

$$P.N.(K) = 256,4 + 0,1991V_B - 0,000223V_B^2 \quad \text{Ecuación 5.47}$$

#### 5.1.11 Capacidad calorífica

La capacidad calorífica para algunos líquidos se encuentra en función de la temperatura a través de la Ecuación:

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad \text{Ecuación 5.48}$$

Las constantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  se encuentran tabuladas para algunos líquidos en la literatura.

Cuando no se conoce o no está disponible el valor de la capacidad calorífica de los líquidos, para líquidos de naturaleza orgánica, Valencia (71) propone la siguiente ecuación da la relación entre la

capacidad calorífica en unidades másicas y la masa molecular, a una temperatura de 25 °C, con bastante exactitud:

$$C_p = rM^a \quad \text{Ecuación 5.49}$$

Donde  $M$  es la masa molecular y  $r$  y  $a$  son constantes que dependen de la familia a que pertenece el compuesto. Para ésteres  $r$  ha sido estimado como 0.60 y  $a$  como -0.0573.

Anand (41) correlacionó el peso molecular de varios metilésteres con su capacidad calorífica y propone la siguiente expresión:

$$C_p = -0,000001M^2 + 0,0009M + 1,9291 \quad \text{Ecuación 5.50}$$

Para las mezclas, la estimación de calores específicos se puede hacer en forma aproximada asumiendo mezcla ideal. Aunque esto no es cierto, particularmente para los electrolitos, se obtienen estimaciones razonables.

$$C_{p,m} = \sum x_i C_{p,i} \quad \text{Ecuación 5.51}$$

Comparando valores experimentales con los calculados por la Ecuación 48 para varias mezclas de todo tipo se encontró poco error para las mezclas de líquidos orgánicos, del orden del 5% para soluciones acuosas orgánicas y del 2% para soluciones de sustancias (60).

### 5.1.12 Número de Prandtl

El número adimensional de Prandtl relaciona la velocidad de difusión de momento con la velocidad de difusión de calor. Por definición se calcula con la expresión:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad \text{Ecuación 5.52}$$

La mayoría de los líquidos tienen números de Prandtl mayores que los de los gases debido a que su viscosidad es dos o más órdenes de magnitud superior a la de éstos, y ello compensa con creces la mayor conductividad calorífica de los líquidos (72).

### 5.1.13 Temperatura de Inflamación

La temperatura de inflamación es la temperatura mínima a la cual un material empieza a desprender vapores sin que estos sean suficientes para sostener una combustión. Su estimación se realizó por medio de una expresión correlacionada por Catoire et al. (73):

$$FP(K) = 0,3544 T_b^{1,14711} z^{-0,07677} \quad \text{Ecuación 5.53}$$

Donde  $z$  es el número de átomos de carbono.

### 5.1.14 Validación de ecuaciones

La idoneidad de estas ecuaciones se evalúa mediante de la desviación media absoluta (AAD), calculado como:

$$AAD = \frac{100}{NP} \sum_{i=1}^{NP} \left| \frac{\varphi_{exp} - \varphi_{pr}}{\varphi_{exp}} \right| \quad \text{Ecuación 5.54}$$

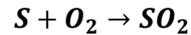
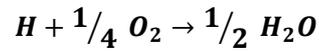
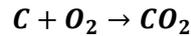
Donde  $NP$  es el número de puntos experimentales reportados en la literatura,  $\varphi$  es la propiedad que se predijo y los subíndices  $exp$  para el valor experimental y de  $pr$  para los valores predichos por las ecuaciones.

## 5.2 Simulación matemática de la combustión de los biocombustibles

La generación de productos de combustión se calculó a través de las ecuaciones del balance de materia de la reacción química de oxidación de los elementos constituyentes de la mezcla. Se determinó la composición de los gases y con ésta se evaluaron las propiedades termofísicas de los mismos, como densidad, viscosidad, capacidad calorífica, conductividad térmica y número de Prandtl a través de ecuaciones conocidas para mezclas de gases ideales.

### 5.2.1 Producción de gases de combustión

La producción de productos de combustión y su composición se realizó a partir de su análisis elemental y se basó en las siguientes reacciones químicas de oxidación:



Para el cálculo se usaron diferentes relaciones de exceso de aire:  $\lambda = 1,0, 1,02, 1,05, 1,08$  y  $1,1$ .

### 5.2.2 Capacidad calorífica

Conocida la composición de la mezcla de gases y las constantes para calcular la capacidad calorífica de los componentes puros, la capacidad calorífica de la mezcla de gases se estimó a partir de la expresión:

$$C_{p,mezcla} = \sum (x_i a_i + x_i b_i T + x_i c_i T^2 + x_i d_i T^3) \quad \text{Ecuación 5.55}$$

Con esta expresión se puede calcular la capacidad calorífica de la mezcla de gases a cualquier temperatura.

### 5.2.3 Viscosidad

En las tablas de propiedades de componentes puros se dispone de valores de viscosidad a  $0^\circ\text{C}$ . Con estos valores, los pesos moleculares de los componentes puros y la composición de gases conocida, se evalúa la viscosidad de la mezcla de gases a esa temperatura de acuerdo a la expresión:

$$\mu = \frac{\sum \mu_i y_i \sqrt{M_i}}{\sum y_i \sqrt{M_i}} \quad \text{Ecuación 5.56}$$

### 5.2.4 Conductividad térmica

Para estimar la conductividad térmica de las mezclas de gases se usó una expresión idéntica a la de la viscosidad (60). Los valores de conductividad térmica de los gases puros a  $0^\circ\text{C}$  se encuentran tabulados.

$$k = \frac{\sum k_i y_i \sqrt{M_i}}{\sum y_i \sqrt{M_i}}$$

Ecuación 5.57

### 5.2.5 Número de Prandtl

El número adimensional de los productos de combustión se calculó con la Ecuación 5.52.

## 5.3 Estimación del impacto ambiental producido por el uso de biocombustibles.

La base de esta determinación es la suposición de la combustión perfecta de los combustibles implicados. Aunque es claro que la combustión completa técnicamente no se lleva a cabo en la realidad, es un buen estimativo para comparar la proporción con al cual se emiten productos de combustión para cada mezcla de combustible – biocombustible.

Para el propósito del análisis se tienen en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub> y vapor de H<sub>2</sub>O debido a las implicaciones que éstos tienen en el efecto invernadero, las emisiones de SO<sub>2</sub> por ser precursor de lluvia ácida y los requerimientos de O<sub>2</sub>, por ser un factor que consume recursos.

Inicialmente se estimó el impacto ambiental representado en la suma de los factores anteriores por kg de mezcla, posteriormente, se corrigió teniendo en cuenta el poder calorífico de las mezclas y realizando los cálculos para una misma demanda energética. Posteriormente, se realizó la corrección descontando el CO<sub>2</sub> generado por la combustión de los biocombustibles debido a la consideración de que es el mismo absorbido de la atmósfera para la formación de los vegetales que les dieron origen.

Adicionalmente, se realizó una revisión para analizar la reducción o incremento de emisiones encontradas por diversos autores cuando usaron biocombustibles en la combustión.

Para las mezclas de biodiesel se usó un modelo de la EPA para estimar el porcentaje de reducción de emisiones para diferentes tipos de biodiesel.

#### **5.4 Diseño conceptual de un laboratorio para la certificación de los biocombustibles**

De acuerdo a las normas técnicas colombianas NTC 5444 para el biodiesel en correspondencia con las normas internacionales ASTM y E1 14214 y la norma técnica colombiana NTC 5308 para el bioetanol se realizó un estudio detallado de ambas normas para elaborar los lineamientos requeridos por un laboratorio para la certificación de la calidad fisicoquímica de bioetanol y biodiesel. Se identificaron los equipos y reactivos requeridos para dicho laboratorio y se elaboró una guía metodológica para cada una de las normas.

## 6. ESTIMACION DE PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ETANOL – GASOLINA

### 6.1 Estimación de la densidad del bioetanol y sus mezclas

Las diferentes mezclas de etanol - gasolina, son denominadas EX, donde X representa el porcentaje en volumen de etanol en la mezcla. Por ejemplo, la mezcla E10, corresponde a una mezcla de 10% de etanol en volumen y 90% de gasolina. Además debe tenerse en cuenta el contenido de agua, que para el etanol anhidro se ha supuesto del 1% en volumen.

Para estimar la densidad del etanol anhidro, considerado con un 1% en volumen de agua, inicialmente se convirtió el porcentaje en volumen a porcentaje en masa usando como densidad del etanol puro 0,789 kg/l (69) y del agua pura 1 kg/l.

La densidad de las diferentes mezclas etanol-gasolina, se calculó teniendo en cuenta la Ecuación 5.2. Para la gasolina se consideró la fórmula molecular propuesta por Agarwal (11)  $C_7H_{16}$ , con densidad relativa de 0,737.

Por ejemplo, 100 l de mezcla E10, contienen 0,1 l de agua, 9,9 l de etanol y 90 l de gasolina, conocida la densidad de cada componente, se calcula la composición másica, y conocido el peso molecular, se calcula la composición molar como se muestra en la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1. Composición volumétrica, másica y molar de la mezcla E10**

	% vol	Densidad, kg/l	% masa	PM	% mol
Agua	0,1	1	0,1%	18	0,03%
Etanol	9,9	0,79	10,5%	46	5,11%
Gasolina	90	0,737	89,4%	100	94,86%

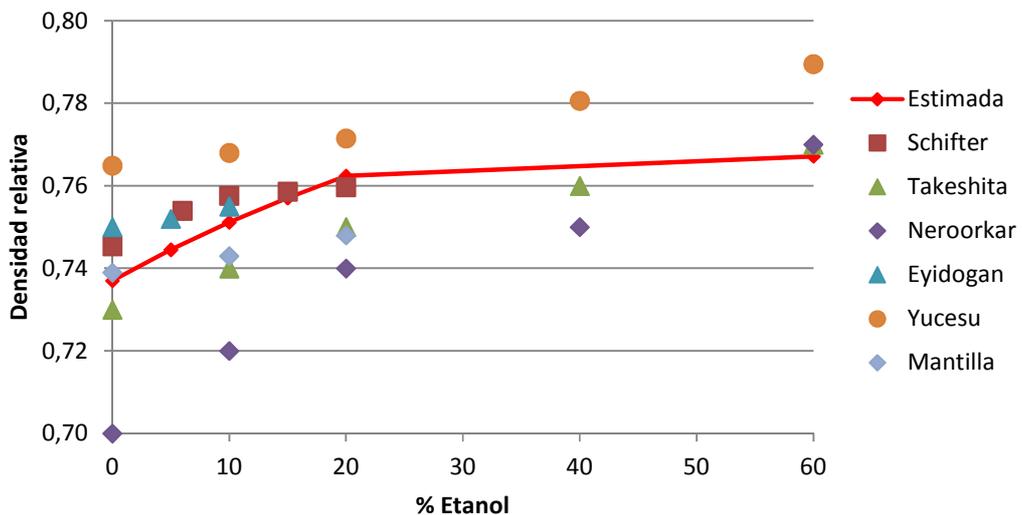
Las fracciones molares de las diferentes mezclas etanol-gasolina y sus densidades se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6. Fracciones molares de las mezclas etanol-gasolina**

	x gasolina	x etanol	x agua	Densidad, kg/l
Gasolina	1,000	-	-	0,737
E5	0,891	0,105	0,003	0,745
E10	0,795	0,198	0,006	0,751
E15	0,710	0,281	0,009	0,757
E20	0,634	0,355	0,011	0,762
E25	0,565	0,422	0,014	0,767
E60	0,224	0,752	0,024	0,791
E100	-	0,969	0,031	0,806

Yücesu et al. (74), Schifter et al. (75), Eyidogan et al. (76), Neroorkar (77) y Takeshita (78) estudiaron la densidad de diferentes mezclas de etanol con gasolina, estos resultados se comparan con los valores obtenidos en la Figura 5. Se observa una tendencia similar, teniendo en cuenta la diferencia entre la densidad de la gasolina sin mezclar usada en este trabajo y en los de los otros investigadores.

La desviación calculada entre el valor de densidad estimado y el valor de densidad experimental promedio usando la Ecuación 5.54 es del 0,09%.



**Figura 5. Densidad de las mezclas etanol – gasolina estimada y reportada**

## 6.2 Gravedad API

La gravedad API se determinó de acuerdo a la Ecuación 5.7. La densidad relativa resulta del cociente entre la densidad y la densidad del agua a una temperatura de referencia. A temperaturas cercanas a la ambiental, la densidad del agua es 1,0 kg/l.

Tomando los valores de las densidades de las mezclas calculadas anteriormente y dividiéndolas entre la densidad del agua expresada como 1 kg/l, resultan los valores de la gravedad API para las diferentes mezclas y que se muestran en la Tabla 6..

**Tabla 6.3. Densidad relativa y °API para mezclas de etanol - gasolina**

% Bioetanol	0	5	10	15	20	60	100
Densidad relativa	0,737	0,745	0,751	0,757	0,762	0,791	0,737
°API	60,49	58,56	56,87	55,40	54,10	52,95	47,44

## 6.3 Estimación de la composición del bioetanol y sus mezclas

La mayoría de las propiedades físicas y térmicas de las sustancias son función de su composición. En esta sección se muestra la determinación de la composición elemental del etanol y sus mezclas con la gasolina.

### 6.3.1 Análisis elemental de los componentes puros

El etanol tiene por fórmula molecular  $C_2H_6O$ , con lo cual su análisis elemental está dado, sin embargo debe tenerse en cuenta el contenido de agua, que para el etanol anhidro se ha estandarizado en el 0,5% máximo. Para la gasolina se tomó como referencia la molécula de n-octano,  $C_8H_{18}$ , al ser este su principal componente.

El porcentaje en masa de cada elemento en los componentes puros se realizó como sigue. Por ejemplo, para el etanol:

$$\text{Masa Carbono} = 2 \text{ moles} \times 12 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 24 \text{ kg C}$$

$$\text{Masa Hidrógeno} = 6 \text{ moles} \times 1 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 6 \text{ kg H}$$

$$\text{Masa Oxígeno} = 1 \text{ moles} \times 16 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 16 \text{ kg O}$$

La masa total del etanol es la suma de la masa de los tres elementos:

$$\text{Masa Etanol} = 24 \text{ kg C} + 6 \text{ kg H} + 16 \text{ kg O} = 46 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O}$$

De manera que el porcentaje en masa de cada elemento en el etanol es:

$$\text{Carbono} = \frac{24 \text{ kg C}}{46 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O}} \times 100\% = 52 \%$$

$$\text{Hidrógeno} = \frac{6 \text{ kg H}}{46 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O}} \times 100\% = 13 \%$$

$$\text{Oxígeno} = \frac{16 \text{ kg O}}{46 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O}} \times 100\% = 35 \%$$

De igual forma se realizó el análisis para el agua y la gasolina ( $\text{C}_7\text{H}_{16}$ ), asumiendo que la gasolina contiene aproximadamente 500 ppm de azufre (79), los datos se muestran en la Tabla 7.

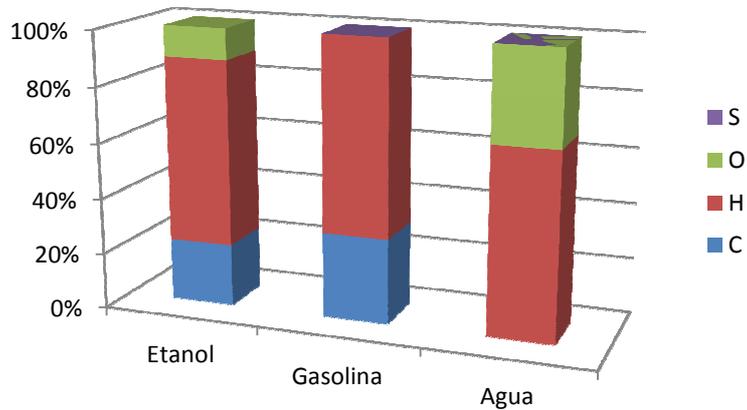
**Tabla 7. Análisis elemental de los componentes puros de las mezclas.**

	% masa			
	C	H	O	S
Gasolina	84,00	16,00	0,00	0,05
Etanol	52,17	13,04	34,78	0
Agua	0,00	11,11	88,89	0

El análisis elemental de los compontes puros, expresados en porcentaje molar se muestra en la Figura.2 Se observa que el oxígeno es aportado por el etanol y que el contenido de carbono es mayor en la gasolina.

### 6.3.2 Análisis elemental de las mezclas etanol - gasolina

Las diferentes mezclas de etanol - gasolina, son denominadas EX, donde la X representa el porcentaje en volumen de etanol en la mezcla. Por ejemplo, la mezcla E10, corresponde a una mezcla de 10% de etanol en volumen y 90% de gasolina. Recordando que en el 10% de etanol, se encuentra presente aproximadamente un 5% de agua.



**Figura 6.2. Análisis elemental molar de los componentes puros de las mezclas etanol-gasolina**

Para determinar la composición de diferentes mezclas etanol-gasolina, se determinó la masa de cada componente en la mezcla, multiplicando el volumen por la densidad del componente, y posteriormente el análisis de cada elemento en la mezcla, teniendo en cuenta los resultados mostrados en la tabla anterior. Por ejemplo, para 100 litros de mezcla E10, los cálculos se muestran en la Tabla 6.5:

**Tabla 6.5. Masa de los componentes en la Mezcla E10**

	Volumen (l)	Masa (kg)
Gasolina (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	90	66,33
Etanol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O)	9,9	7,77
Agua (H <sub>2</sub> O)	0,1	0,10

$$kg C = 66,33 \text{ kg } C_7H_{16} \times \frac{84,00 \text{ kg } C}{100 \text{ } C_7H_{16}} + 7,77 \text{ kg } C_2H_6O \times \frac{52,17 \text{ kg } C}{100 \text{ } C_2H_6O} = 59,77 \text{ kg } C$$

$$kg H = 66,33 kg C_7H_{16} \times \frac{16 kg H}{100 C_7H_{16}} + 7,77 kg C_2H_6O \times \frac{13,04 kg H}{100 C_2H_6O} + 0,1 kg H_2O \times \frac{11,11 kg H}{100 H_2O}$$

$$= 11,64 kg H$$

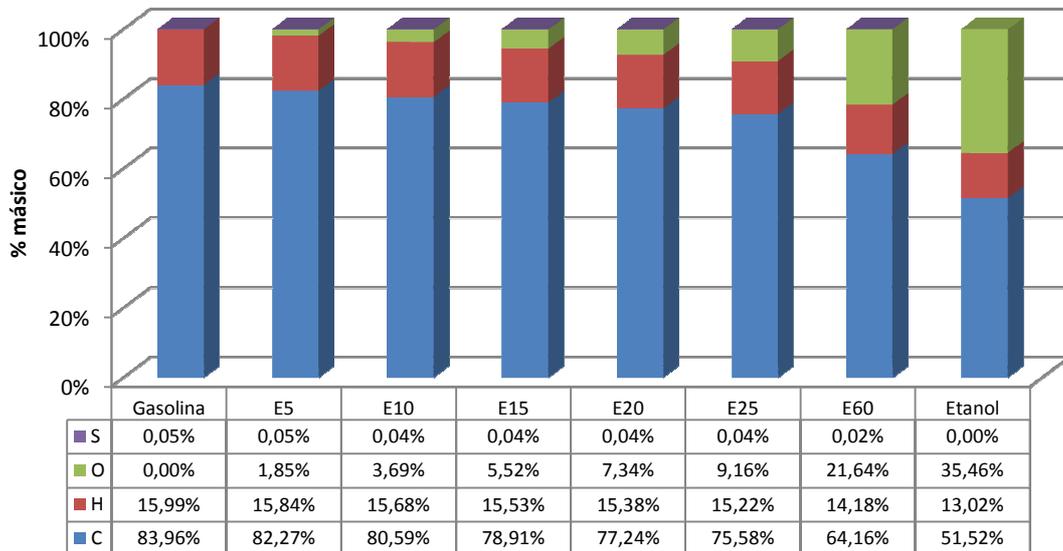
$$kg O = 7,77 kg C_2H_6O \times \frac{34,78 kg O}{100 C_2H_6O} + 0,1 kg H_2O \times \frac{88,89 kg O}{100 H_2O} = 2,79 kg O$$

$$kg S = 66,33 kg C_7H_{16} \times \frac{0,05 kg S}{100 C_7H_{16}} = 0,033 kg S$$

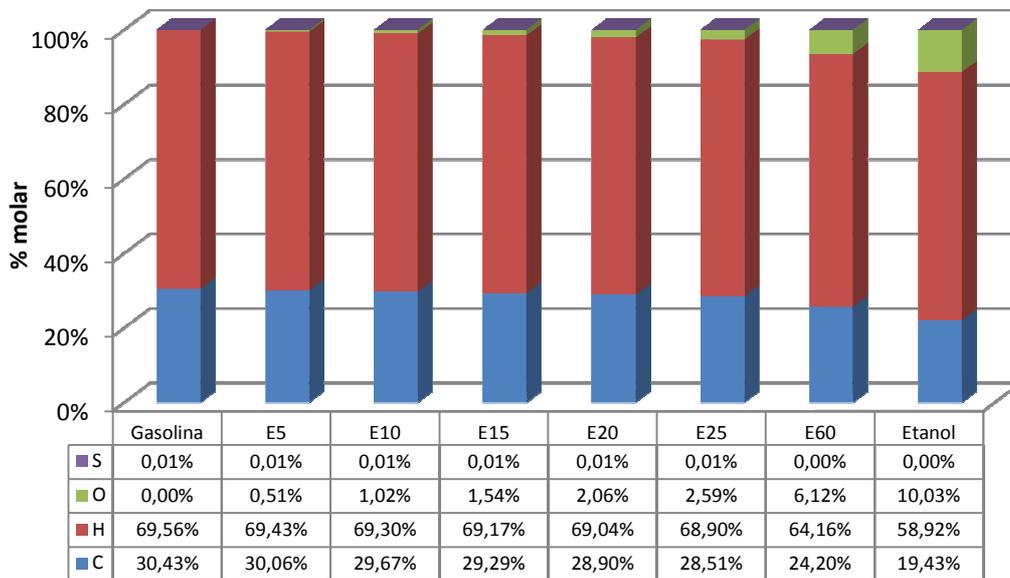
Con la masa total se calcularon los porcentajes de cada elemento en la mezcla. De igual forma se procedió con las demás mezclas. La Figura 6.3 muestra el análisis elemental en fracción másica para el etanol y diferentes mezclas.

Se observa el incremento en el contenido de oxígeno y la disminución en el carbono al aumentar el porcentaje de etanol en la mezcla.

De igual forma, el análisis elemental se puede expresar en base molar, como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.3. Análisis elemental másico de mezclas de etanol**



**Figura 6. Análisis elemental molar de mezclas de etanol**

### 6.3.3 Relación C/H de las mezclas

A partir de los datos obtenidos para el análisis elemental de las diferentes mezclas de etanol, se calculó la relación C/H como el cociente entre el porcentaje másico de carbono y el porcentaje másico de hidrógeno. Los resultados se observan en la Tabla 8.

**Tabla 8. Relación C/H de las mezclas etanol - gasolina**

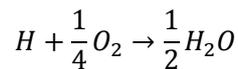
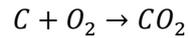
Mezcla	Relación C/H
Gasolina	5,25
E5	5,19
E10	5,14
E15	5,08
E20	5,02
E25	4,96
E60	4,53
E100	3,96

La relación C/H para las mezclas etanol-gasolina es muy variable debido al mayor contenido de hidrógeno en el etanol, el cual disminuye la relación al aumentar el contenido de etanol en la

mezcla. Debido a que estos valores son inferiores a 6, se espera un menor poder calórico en estas mezclas.

#### 6.4 Cálculo del aire teórico requerido para la combustión

El cálculo se basa en las siguientes reacciones:



Para 1 kg de mezcla E10, que de acuerdo a la Figura 6.3 contiene 0,8059 kg de C, 0,1568 kg de H, 0,0102 kg de O, y 0,0045 kg de S, se procedió de la siguiente manera:

$$O_2 \text{ teórico} = 0,8059 \text{ kgC} \left( \frac{32 \text{ kgO}}{12 \text{ kgC}} \right) + 0,1568 \text{ kgH} \frac{1}{4} \left( \frac{32 \text{ kgO}}{1 \text{ kgH}} \right) + 0,0045 \text{ kgS} \left( \frac{32 \text{ kgO}}{32 \text{ kgS}} \right) - 0,0102 \text{ kgO}$$

$$O_2 \text{ teórico} = 3,37 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgde mezcla}}$$

Teniendo en cuenta que el aire atmosférico contiene un 23,1% en peso de O<sub>2</sub>, se calcula la cantidad de aire teórico:

$$\text{Aire teórico} = 3,37 \text{ kg O}_2 \times \left( \frac{1 \text{ kg aire}}{0,231 \text{ kg O}_2} \right) = 14,58 \text{ kg aire}$$

Realizando los mismos cálculos para diferentes mezclas etanol-gasolina, se resumen los resultados en la Tabla 6..

**Tabla 6.7. Oxígeno y Aire teórico requerido por las mezclas etanol-gasolina.**

Mezcla	O <sub>2</sub> requerido Kg/kg mezcla	Aire requerido Kg/kg mezcla
Gasolina	3,52	15,23
E5	3,44	14,90
E10	3,37	14,58
E15	3,29	14,25
E20	3,22	13,93
E25	3,14	13,60
E60	2,63	11,38
Etanol	2,06	8,92

Este resultado es similar al encontrado por Yücesu et al. (74) cuya comparación se muestra en la Figura 7. Acevedo (80) reportó 14,140 kg aire/kg combustible para la mezcla E10, que es cercano al valor estimado de 14,47 en este estudio. Al calcular el error medio relativo entre los valores experimentales y los valores predichos, se obtiene un error de un 2,6%.

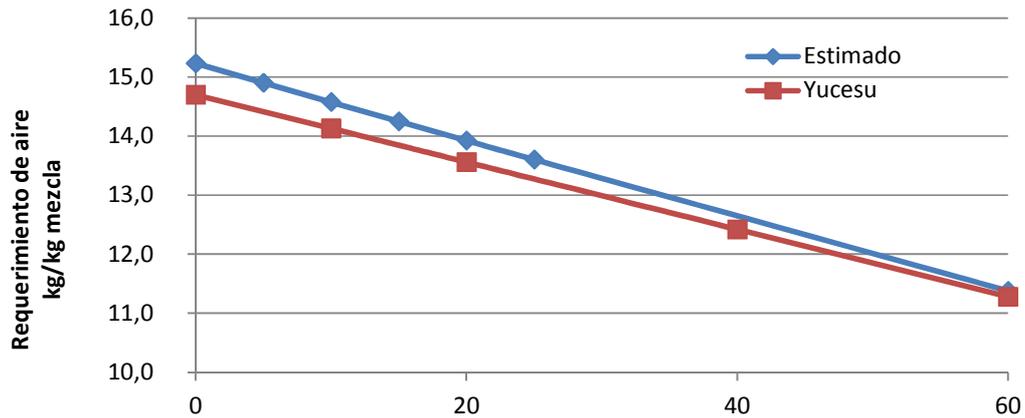
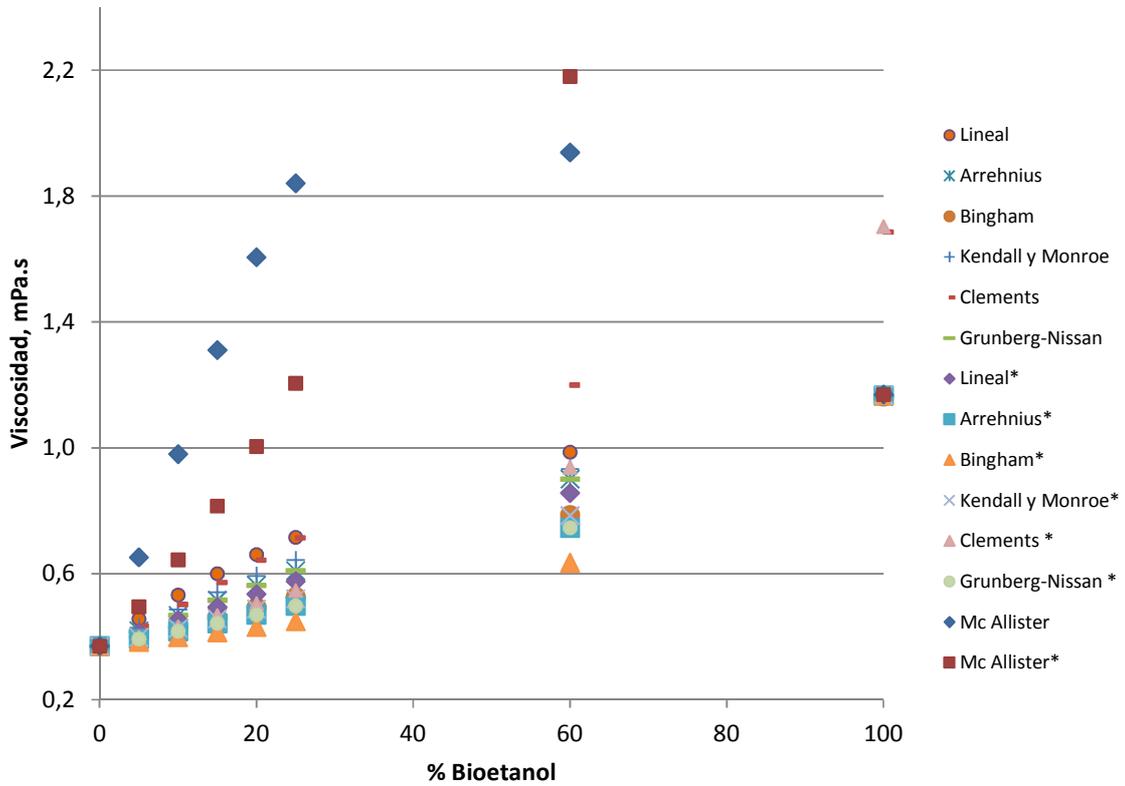


Figura 7. Aire teórico requerido para mezclas etanol-gasolina

### 6.5 Viscosidad de las mezclas etanol – gasolina

En este trabajo se usaron las ecuaciones 5.8 a la 5.14 reemplazando las fracciones másicas y molares. Las viscosidades usadas para los componentes puros a 40°C son: 1,17 mPa.s para el etanol, 0,37 mPa.s para la gasolina y 1,0 mPa.s para el agua. Los resultados de estas estimaciones se muestran en la Figura 6.6.

Estos valores son comparados con los experimentales encontrados en la literatura. Kiatkittipong et al. (81) reportan una viscosidad de 0,505 mPa.s para la mezcla E10 a 20°C. Eyidogan (76) evaluó la viscosidad de algunas mezclas etanol – gasolina (E5 y E10) y sus resultados son parecidos a los estimados.

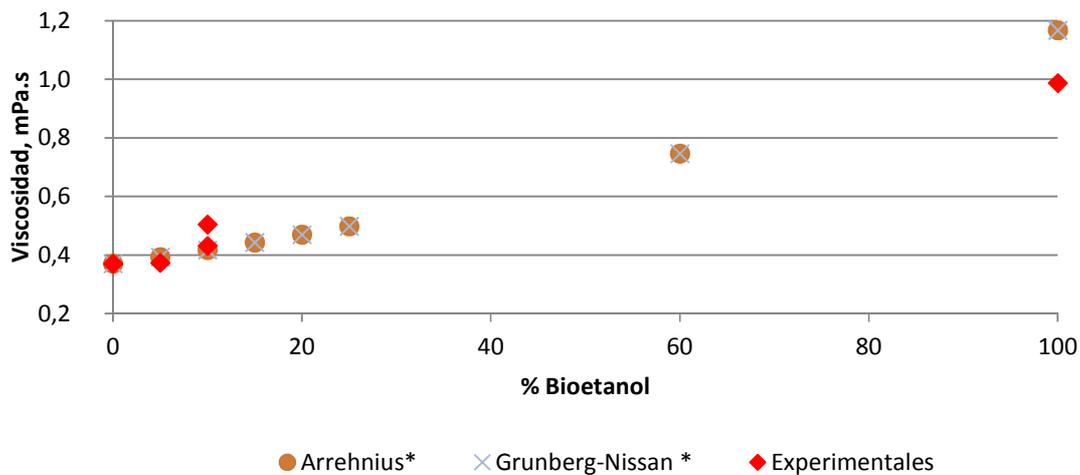


**Figura 6.6. Viscosidad estimada para mezclas etanol-gasolina.**

\* Estimaciones realizadas con las fracciones másicas.

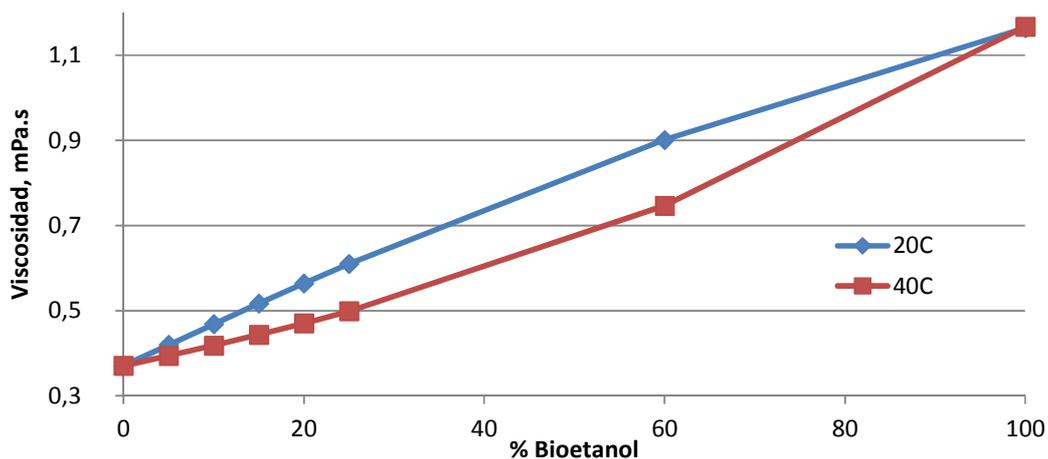
Calculando la desviación con respecto a los datos experimentales por medio de la Ecuación 54, los modelos que mejor se ajustaron a los datos experimentales fueron el de Arrehnius y Grunberg - Nissan usando la fracción másica con un error medio de 0,34 % con respecto a los datos experimentales. Estos valores junto con los experimentales se muestran en la Figura 8.

La viscosidad aumenta al aumentar el contenido de etanol en la mezcla debido al incremento en el contenido de oxígeno.



**Figura 8. Viscosidad estimada y experimental para mezclas etanol-gasolina.**

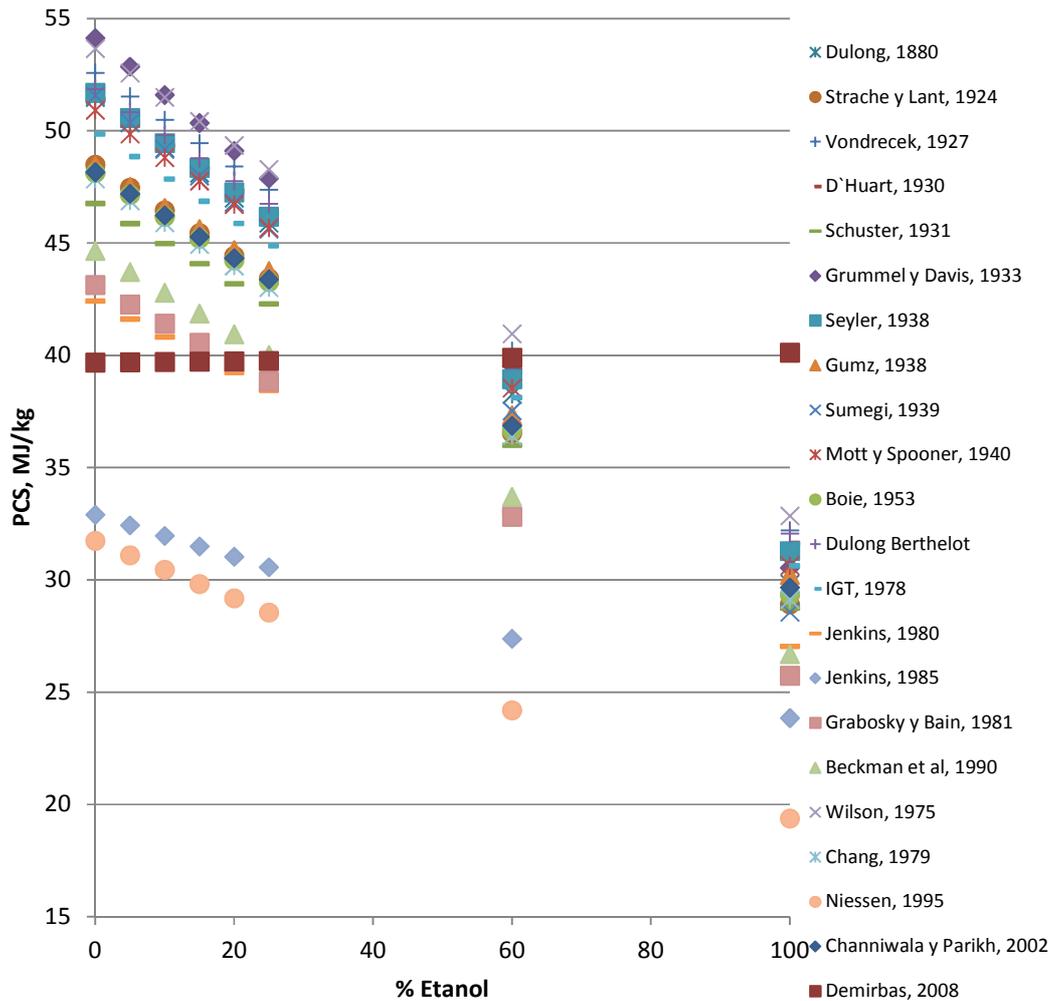
Para estimar la viscosidad a 20°C, se usó el modelo de Arrhenius con datos de los componentes puros reportados por Martínez (82), 1,19 mPa.s para el etanol, 0,409 mPa.s para la gasolina y 1,0 mPa.s para el agua. Los resultados para las viscosidades estimadas a 20 y 40°C se muestran en la Figura 6.8. Como es de esperarse para el estado líquido, hay una leve disminución de la viscosidad al aumentar la temperatura.



**Figura 6.8. Viscosidad estimada para mezclas etanol-gasolina a 20 y 40°C**

## 6.6 Cálculo del poder calorífico de las mezclas de etanol

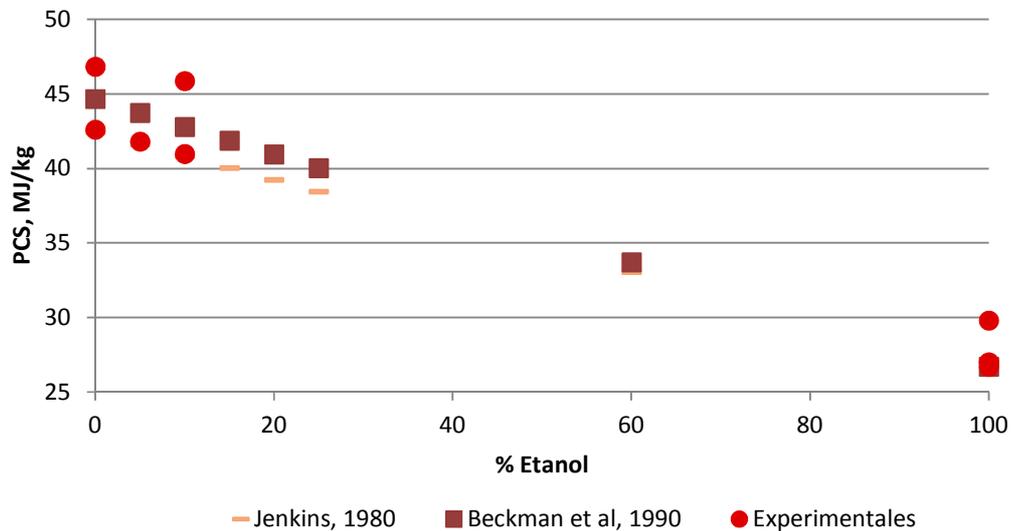
La estimación del poder calorífico superior para cada una de las mezclas se realizó teniendo en cuenta las ecuaciones 5.17 a la 5.38. Estas ecuaciones se basan en el análisis elemental másico del combustible. Los resultados se muestran en la Figura 9.



**Figura 9. Poder calorífico superior estimado para mezclas etanol-gasolina**

Para seleccionar la ecuación más adecuada para las mezclas etanol – gasolina, se compararon estos valores con los reportados en la literatura. Para E100, Bhale et al. (83) reportan un PCS de 27 MJ/kg, Eyidogan (76) 26, 7 MJ/kg y Barroso (84) de 29,8 MJ/kg. Para E5, Eyidogan reporta un PCS

de 41,799 MJ/kg, y para E10 Acevedo (80) reporta 45,86 MJ/kg. Eyidogan además reporta para la mezcla E10 un PCS de 40,969 MJ/kg. Se calcularon las desviaciones con respecto a los datos reales usando la ecuación 5.54. Los modelos que mejor se ajustaron a los valores experimentales fueron el de Beckman con un error del 1,1% y el de Jenkins con el 3,7% con respecto a los valores experimentales. Estos resultados experimentales con los estimados por los modelos de Beckman y Jenkins se aprecian mejor en la Figura 10. En todos los modelos es evidente que el aumento en el contenido de etanol en la mezcla disminuye el poder calorífico, lo cual es de esperarse si se tiene en cuenta el menor contenido de carbono en el etanol en comparación con la gasolina.



**Figura 10. Poder calorífico superior estimado y valores reportados**

### 6.7 Conductividad de las mezclas etanol – gasolina

Para la estimación de la conductividad térmica de las mezclas etanol – gasolina se usaron las Ecuaciones 5.40, 5.41 y 5.42. Los datos usados para la conductividad de los componentes puros a 20°C fueron: 0,18 W/m K para el etanol, 0,13 W/m K para la gasolina y 0,6 W/m K para el agua, valores reportados por Martínez (82). Los resultados se muestran en la Figura 6.11.

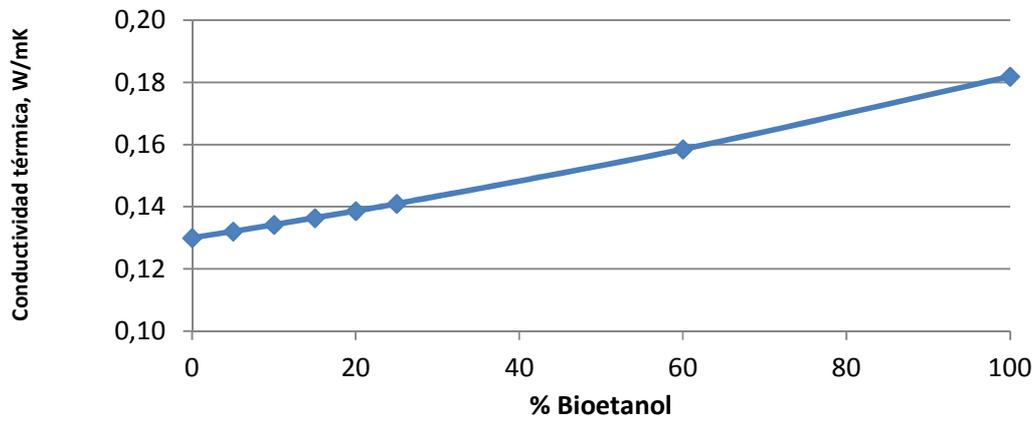


Figura 6.11. Conductividad térmica de mezclas bioetanol-gasolina.

### 6.8 Capacidad calorífica del etanol y sus mezclas

La capacidad calorífica de las mezclas se calculó a partir de la Ecuación 5.51. Para los valores de  $C_p$  a 20°C para las sustancias puras, se tomaron los datos reportados por Nan et al. (85). Para la gasolina, 2,13 J/g·K, para el etanol, 2,38 J/g·K y para el agua 4,18 J/g·K. Los resultados para cada mezcla se muestran en la Figura 6.111.

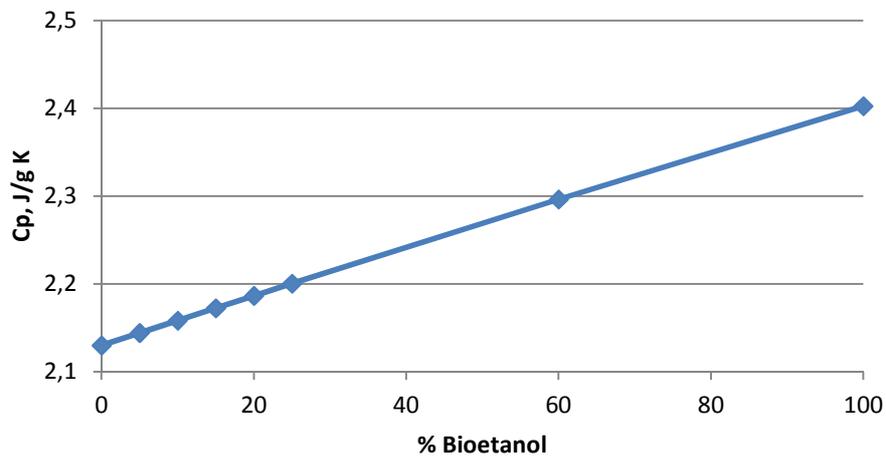


Figura 6.111. Capacidad calorífica de mezclas bioetanol-gasolina.

Es notable el incremento de la capacidad calorífica de las mezclas cuando aumenta el contenido de etanol, debido a la mayor capacidad calorífica de éste en relación con la gasolina sin mezclar.

### 6.9 Número de Prandtl del etanol y sus mezclas

Reemplazando en la Ecuación 5.52 los valores estimados de viscosidad dinámica, conductividad térmica y capacidad calorífica a 20°C, se calcularon los números de Prandtl para cada una de las mezclas, y se muestran en la Figura 6.13.

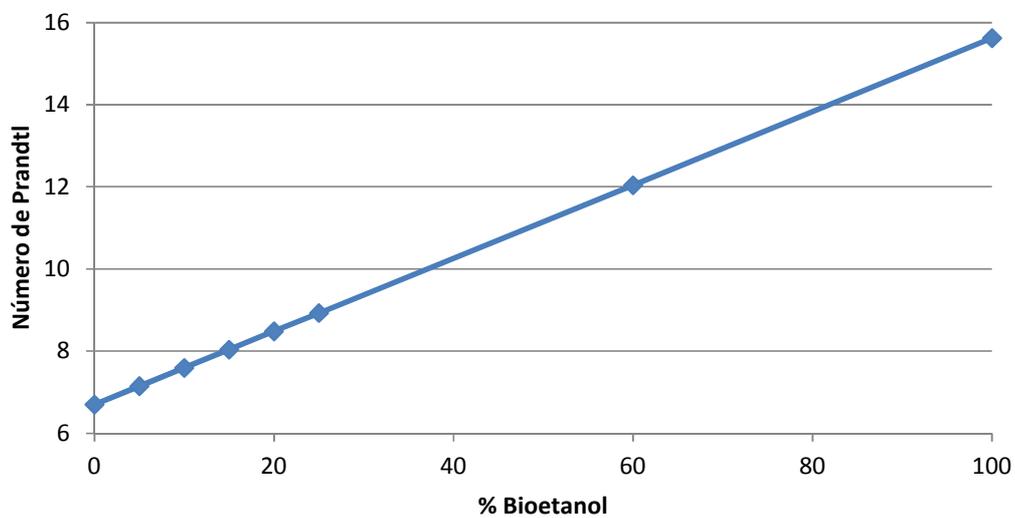
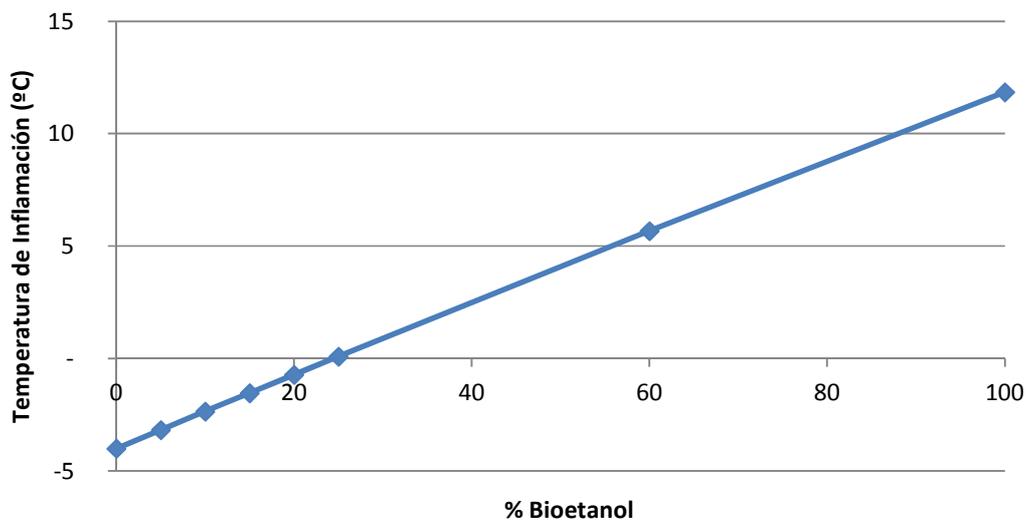


Figura 6.13. Número de Prandtl de mezclas bioetanol-gasolina.

### 6.10 Temperatura de inflamación

La temperatura de inflamación del etanol se reporta en 12°C. La de la gasolina dependerá de sus componentes, para este trabajo se usó la del heptano, reportada en -4 °C. Usando la regla de la mezcla ideal, de la Ecuación 5.1, se estimaron los valores de temperatura de inflamación de las mezclas etanol – gasolina y se muestran en la Figura 6.146.14.



**Figura 6.14. Temperatura de inflamación de mezclas bioetanol-gasolina.**

A manera de conclusión de este capítulo, la Tabla 6.8 muestra las desviaciones calculadas por medio de la Ecuación 5.54 para aquellas propiedades cuyos valores se encontraron reportados en la literatura. Se observan mejores ajustes para la densidad y el aire teórico requerido y mayor desviación para la viscosidad y el poder calorífico superior.

**Tabla 6.8. Desviación promedio de las estimaciones realizadas**

Propiedad	Desviación promedio
Densidad	0,09%
Viscosidad dinámica a 40°C	0,34%
Poder calorífico superior	1,12%
Aire teórico	2,6%

## 7. ESTIMACION DE PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BIODIESEL – DIESEL

### 7.1 Densidad

La estructura y fórmula molecular del biodiesel no es constante, porque depende en gran medida de las materias primas usadas y del proceso de producción y purificación. Para este estudio se tomó como referencia la composición del biodiesel de palma de aceite, teniendo en cuenta que es la materia prima usada en Colombia, y de acuerdo con la composición reportada por varios autores (86), (22) y (23), y que se muestra en la Tabla 7.9.

**Tabla 7.9. Composición típica del biodiesel de palma.**

Metil éster	Fórmula abreviada	Fórmula molecular	% Masa	Densidad, kg/l
Metil palmitato	C16:0	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	45	0,85
Metil miristato	C14:0	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	1	0,867
Metil estereato	C18:0	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	4	0,85
Metil oleato	C18:1	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	40	0,87
Metil linoleato	C18:2	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	10	0,889

Para calcular la densidad del biodiesel se procedió de acuerdo a dos métodos:

#### 7.1.1 Densidad promedio molar

Se usó la Ecuación 5.2 y las composiciones máxicas de la Tabla 7.9 convertidas a composición molar por medio de los pesos moleculares de los metilésteres, y se presentan en la Tabla 7.10.

**Tabla 7.10. Composición molar del biodiesel de palma.**

	% Masa	Peso Molecular	% molar
Metil palmitato	45	270	47,16
Metil miristato	1	242	1,17
Metil estereato	4	298	3,80
Metil oleato	40	296	38,24
Metil linoleato	10	294	9,63

Reemplazando los valores de densidad de la Tabla 7.9 y de composición molar de la Tabla 7.10 en la Ecuación 5.2 se obtiene que la densidad del biodiesel es 0,862 kg/l.

### 7.1.2 Ecuación de Rackett

Se usaron las ecuaciones 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6. Sales-Cruz et al. (56) obtuvieron los valores de  $P_c$ ,  $T_c$  y  $Z_{RA}$  para varios metilésteres, los cuales son mostrados en la Tabla 7.3.

**Tabla 7.3. Propiedades críticas de los metilésteres del biodiesel**

	$T_c$ (K)	$P_c$ (bar)	$Z_{RA}$
Metilpalmitato	717,63	12,55	0,23154
Metil miristato	691,81	14,31	0,23757
Metil estereato	740,23	11,12	0,22559
Metil oleato	738,21	10,89	0,22134
Metil linoleato	836,16	10,67	0,21606

Reemplazando los valores de las Tabla 7.3 y Tabla 7.10 en las Ecuaciones 5.3, 5.4 y 5.5 se calculan las propiedades críticas del biodiesel, que se muestran en la Tabla 7.4.

**Tabla 7.4. Propiedades críticas del biodiesel**

	$T_c$ (K)	$P_c$ (bar)	$Z_{RA}$
Biodiesel	737,4658	11,7005	0,2260

Reemplazando los valores de la Tabla 7.4 en la Ecuación 5.2 se obtiene que la densidad molar del biodiesel resulta de  $0,00305 \text{ mol/cm}^3$ . Para obtener la densidad se requiere el peso molecular promedio del biodiesel calculado a partir de la composición molar y los pesos moleculares dados en la Tabla 7.10.

El peso molecular promedio del biodiesel calculado es de 282,99 y la densidad estimada es 0,862 kg/l. Se observa que el valor es igual al estimado con el primer método.

Otros autores han encontrado experimentalmente la densidad del biodiesel de palma y han reportado valores similares como: 0,864 kg/l (86), 0,877 kg/l (22) y 0,872 kg/l (23), 0,876 kg/l (87), 0,88 kg/l (88), 0,8565 kg/l (55). Baroutian et al. (53) estimaron la densidad del biodiesel de palma usando la metodología de redes neuronales artificiales y obtuvieron un valor de 0,877 kg/l.

Srivastava et al. (89) encontraron un valor de 0,88 kg/l. Por otro lado, en el seguimiento realizado por Fedepalma, Cenipalma y Ecopetrol a tres productores de biodiesel de palma en Colombia encontraron valores de 0,867, 0,875, y 0,875 (19).

Estos valores se comparan en la Figura 7.1. Estos valores se encuentran entre 0,83 y 0,88 con un promedio en 0,87. El valor estimado se encuentra dentro del rango con un 0,9% de desviación con respecto al promedio calculado por medio de la Ecuación 5.54.

En Colombia, la Resolución No. 180782 de Mayo 30 de 2007 del Ministerio de Minas y Energía establece los requisitos de calidad para el biodiesel y fija para la densidad un rango entre 0,86 y 0,90, por lo tanto la densidad estimada para el biodiesel de palma se encuentra dentro de los límites requeridos.

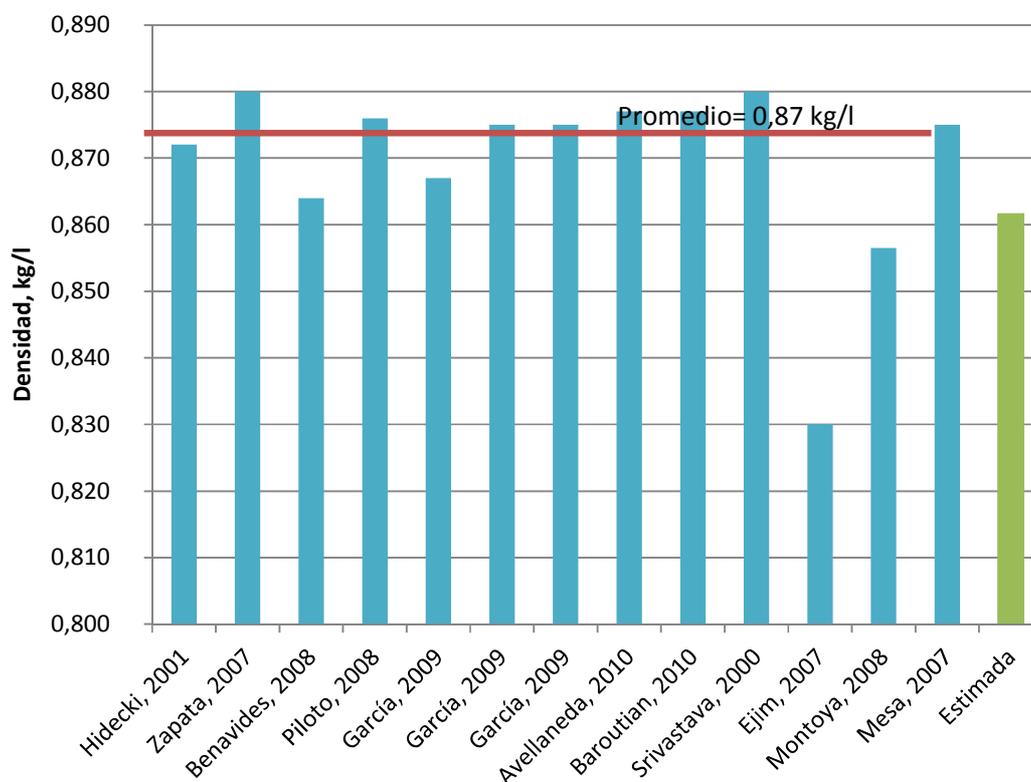


Figura 7.1. Densidad del biodiesel de palma según literatura

El diesel es una mezcla compleja de hidrocarburos compuesta principalmente de parafinas y aromáticos. La densidad promedio del diesel usado en este trabajo, de acuerdo a algunas referencias consultadas se estimó en 0,856 kg/l. El número de carbonos que lo forman se encuentra entre 10 y 22 aproximadamente y la fórmula molecular promedio estimada y citada por varios autores es  $C_{14}H_{30}$  (11).

Con estos valores y usando la Ecuación 5.2 se determinó la densidad de las diferentes mezclas biodiesel-diesel.

Por ejemplo, 100 l de mezcla B10, contienen 10 l de biodiesel y 90 l de diesel, conocida la densidad de cada componente, se calcula la composición másica, y conocido el peso molecular, se calcula la composición molar como se muestra en la Tabla 7.5.

**Tabla 7.5. Composición másica y molar de las mezclas biodiesel-diesel**

	% Volumen biodiesel	% Volumen diesel	% Masa biodiesel	% Masa diesel	X molar biodiesel	X molar diesel
Diesel	0	100	0	100	0	1,00
B5	5	95	5	95	0,04	0,96
B10	10	90	10	90	0,07	0,93
B15	15	85	15	85	0,11	0,89
B20	20	80	20	80	0,15	0,85
B25	25	75	25	75	0,19	0,81
B60	60	40	60	40	0,51	0,49
B100	100	0	100	0	1,00	0

Conocida la composición molar y la densidad de cada componente se calcula la densidad de las mezclas, las cuales se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11. Densidades de las mezclas biodiesel-diesel**

	Diesel	B5	B10	B15	B20	B25	B60	B100
<b>Densidad kg/l</b>	0,856	0,856	0,856	0,857	0,857	0,857	0,859	0,862

Yage et al. (90) determinaron experimentalmente la densidad de diferentes mezclas de diesel con biodiesel de aceite de fritura y se obtuvieron resultados semejantes a los estimados en este trabajo. Baroutian et al. (53), Ejim et al. (91) y Alptekin (92) determinaron experimentalmente la densidad y viscosidad de mezclas de biodiesel de palma y diesel. Cenipalma (19) realizó la evaluación y seguimiento de las mezclas de biodiesel de palma y diesel producidas en Colombia (B5, B10, B20, B30 Y B50). El ICP determinó algunas propiedades de las mezclas de biodiesel de palma con diesel regular y con diesel extra en proporciones B0, B2, B5 y B100 (93). Do Nascimento et al. (94) evaluaron las mezclas de biodiesel de palma para uso en turbinas a gas. La Figura 7.2 muestra un comparativo de estos resultados en los que se observa igual tendencia de aumentar la densidad a medida que aumenta el porcentaje de biodiesel y las diferencias se deben a la densidad considerada diesel y biodiesel puros. La desviación promedio con respecto a los datos reales calculada con la Ecuación 5.54 es de 1,4%.

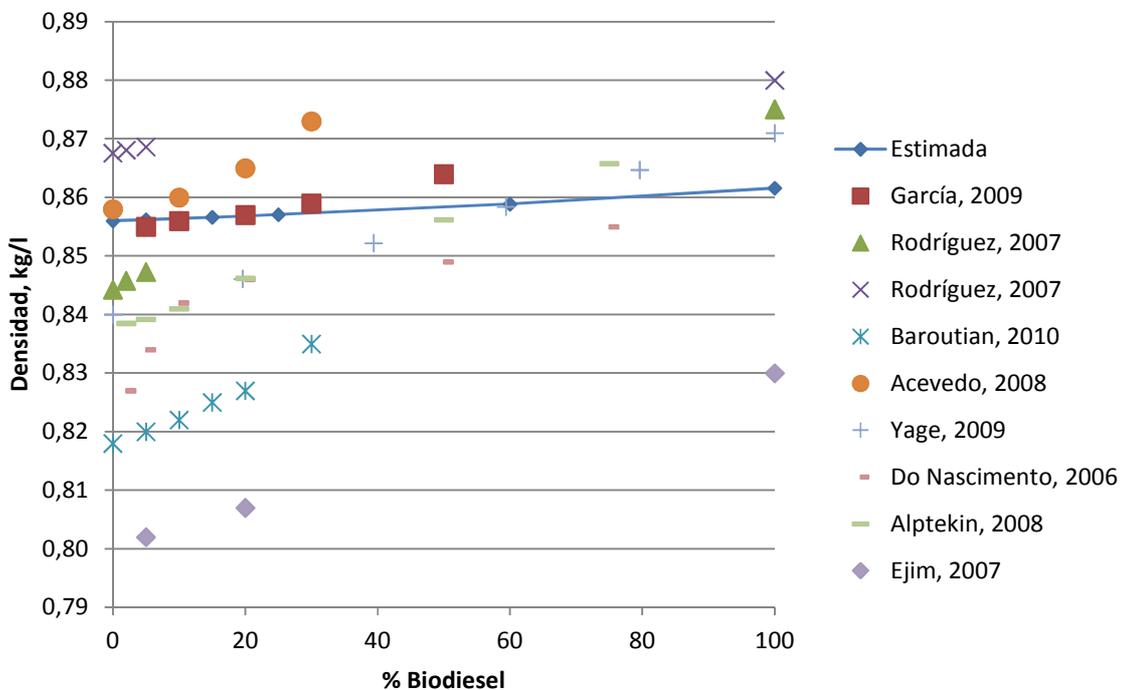


Figura 7.2. Densidad de diferentes mezclas de diesel-biodiesel

## 7.2 Gravedad API

La gravedad API se determinó de acuerdo a la Ecuación 5.7. La densidad relativa resulta del cociente entre la densidad y la densidad del agua a una temperatura de referencia. A temperaturas cercanas a la ambiental, la densidad del agua es 1,0 kg/l.

Tomando los valores de las densidades de las mezclas calculadas anteriormente y que se presentaron en la Tabla 11 y dividiéndolas entre la densidad del agua expresada como 1 kg/l, resultan los valores de la gravedad API para las diferentes mezclas y que se muestran en la Tabla 7.7.

**Tabla 7.7. Densidad relativa y °API para diferentes mezclas de biodiesel**

% Biodiesel	0	5	10	15	20	25	60	100
Densidad relativa	0,856	0,856	0,856	0,857	0,857	0,857	0,859	0,862
°API	33,804	33,766	33,726	33,686	33,644	33,601	33,253	32,729

García et al. (19) reportaron gravedad API de 30,1 y 30,0 para el biodiesel de palma producido en Colombia.

## 7.3 Estimación del análisis elemental

### 7.3.1 Análisis elemental del biodiesel de palma

Para cada una de las sustancias puras que conforman el biodiesel se determinó el análisis elemental. Por ejemplo para el metil palmitato:

$$\text{Masa Carbono} = 17 \text{ moles} \times 12 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 204 \text{ kg C}$$

$$\text{Masa Hidrógeno} = 34 \text{ moles} \times 1 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 34 \text{ kg H}$$

$$\text{Masa Oxígeno} = 2 \text{ moles} \times 16 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 32 \text{ kg O}$$

La masa total de metil palmitato es:

$$\text{Masa de metil palmitato} = 204 \text{ kg C} + 34 \text{ kg H} + 32 \text{ kg O} = 270 \text{ kg C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$$

De manera que el porcentaje en masa de cada elemento en el metil palmitato es:

$$\text{Carbono} = \frac{204 \text{ kg C}}{270 \text{ kg C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2} \times 100\% = 75,56 \%$$

$$\text{Hidrógeno} = \frac{34 \text{ kg H}}{270 \text{ kg C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2} \times 100\% = 12,59 \%$$

$$\text{Oxígeno} = \frac{32 \text{ kg O}}{270 \text{ kg C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2} \times 100\% = 11,85 \%$$

De igual forma se procedió para los otros metilésteres presentes en el biodiesel. El análisis elemental del biodiesel se realizó teniendo en cuenta la composición mostrada en la Tabla 7.9. El análisis elemental de los metilésteres y del biodiesel se presenta en la Tabla 7.8.

**Tabla 7.8. Análisis elemental de los componentes del biodiesel.**

Metiléster	% masa		
	C	H	O
Metil palmitato	75,56	12,59	11,85
Metil miristato	74,38	12,40	13,22
Metil estereato	76,51	12,75	10,74
Metil oleato	77,03	12,16	10,81
Metil linoleato	77,55	11,56	10,88
Biodiesel	76,41	12,31	11,28

El diesel es una mezcla compleja de hidrocarburos compuesta principalmente de parafinas y aromáticos. El número de carbonos que lo forman se encuentra entre 10 y 22 aproximadamente. En este trabajo se tomó como fórmula molecular promedio del diesel  $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ , propuesta por Agarwal (11), de modo que el análisis elemental se puede calcular como:

$$\text{Masa Carbono} = 14 \text{ moles} \times 12 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 168 \text{ kg C}$$

$$\text{Masa Hidrógeno} = 30 \text{ moles} \times 1 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 30 \text{ kg H}$$

Para una masa total de 198 kg/mol, y asumiendo una presencia de azufre en el diesel de 1000 ppm (79), el porcentaje en masa de cada elemento en el diesel es:

C	H	S
84,76%	15,14%	0,1 %

### 7.3.2 Análisis elemental de las mezclas biodiesel - diesel

Para la estimación del análisis elemental de diferentes mezclas diesel–biodiesel se tiene en cuenta que la mezcla BX contiene X porcentaje de biodiesel en volumen. Por ejemplo, la mezcla B10 contiene 10% en volumen de biodiesel y 90% de diesel. Se determinó la masa de cada componente en la mezcla, multiplicando el volumen por la densidad del componente.

Con los datos de densidad del biodiesel y diesel y tomando como ejemplo una mezcla de 100 litros de B10, los cálculos se muestran en la Tabla 7.9.

**Tabla 7.9. Masa de los componentes en la Mezcla B10**

	Volumen (l)	Densidad (kg/l)	Masa (kg)
Biodiesel	10	0,862	8,62
Diesel	90	0,856	77,04

La masa de cada elemento en la mezcla B10 se calculó teniendo en cuenta los datos del biodiesel en la Tabla 7.8:

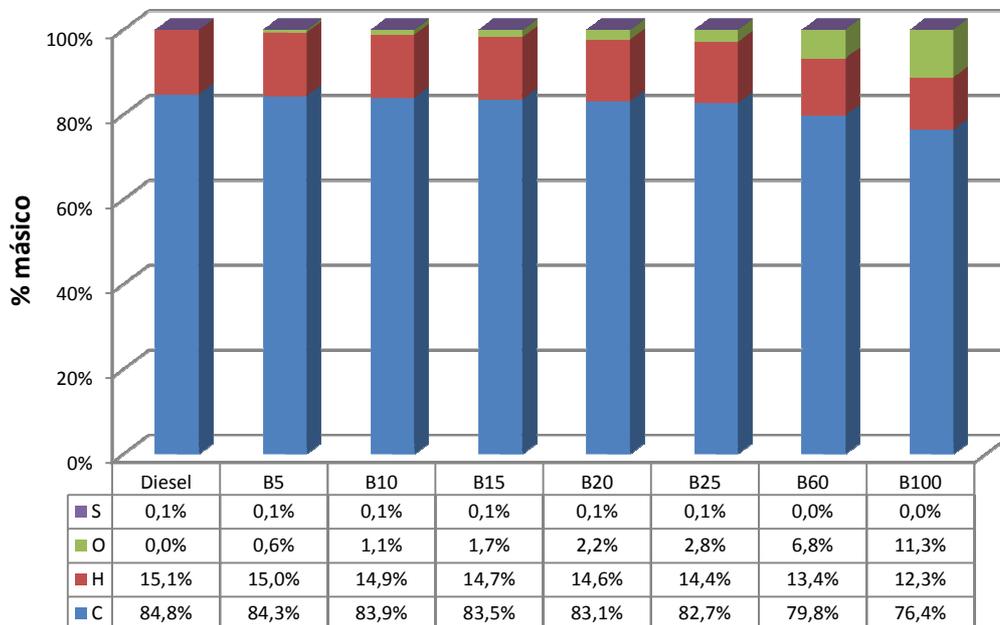
$$\text{kg C} = 8,62 \text{ kg biodiesel} \times \frac{76,41 \text{ kg C}}{100 \text{ kg biodiesel}} + 77,04 \text{ kg diesel} \times \frac{84,76 \text{ kg C}}{100 \text{ kg diesel}} = 72,27 \text{ kg C}$$

$$\text{kg H} = 8,62 \text{ kg biodiesel} \times \frac{12,31 \text{ kg H}}{100 \text{ kg biodiesel}} + 77,04 \text{ kg diesel} \times \frac{15,14 \text{ kg H}}{100 \text{ kg diesel}} = 12,79 \text{ kg H}$$

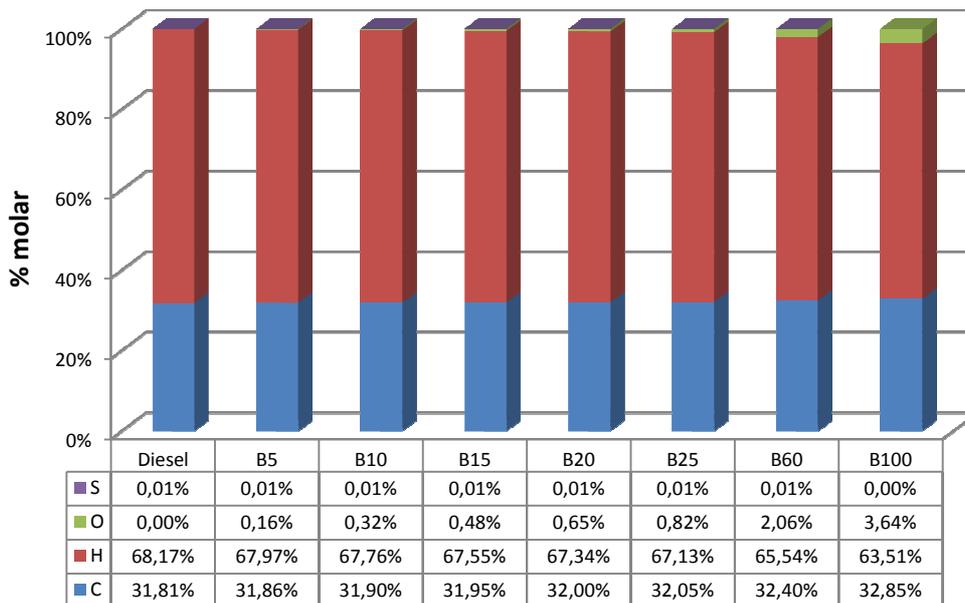
$$kg O = 8,62 \text{ kg biodiesel} \times \frac{11,62 \text{ kg O}}{100 \text{ kg biodiesel}} = 0,97 \text{ kg O}$$

$$kg S = 77,04 \text{ kg diesel} \times \frac{0,10 \text{ kg S}}{100 \text{ kg biodiesel}} = 0,008 \text{ kg S}$$

Con la masa total se calcularon los porcentajes de cada elemento en la mezcla. De igual forma se procedió con las demás mezclas. La Figura 7.3 muestra el análisis elemental en fracción másica para el biodiesel y diferentes mezclas y la Figura 7.4 el análisis elemental molar.



**Figura 7.3. Análisis elemental másico de mezclas de biodiesel**



**Figura 7.4. Análisis elemental molar de mezclas de biodiesel**

Es notable el incremento en el porcentaje de oxígeno al aumentar el biodiesel en la mezcla, el resto de elementos presentan el mismo comportamiento, dado que su presencia en el biodiesel es similar en el diesel.

### 7.3.3 Relación C/H

A partir de los datos obtenidos para el análisis elemental de las mezclas de biodiesel, se calculó la relación C/H como el cociente entre el porcentaje másico de carbono y el porcentaje másico de hidrógeno. Los resultados se observan en la Tabla 7.10.

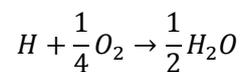
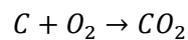
**Tabla 7.10. Relación C/H de las mezclas biodiesel - diesel**

Mezcla	Relación C/H
<b>Diesel</b>	5,60
<b>B5</b>	5,62
<b>B10</b>	5,65
<b>B15</b>	5,68
<b>B20</b>	5,70
<b>B25</b>	5,73
<b>B60</b>	5,93
<b>B100</b>	6,21

La relación C/H para las mezclas biodiesel-diesel aumenta al aumentar el contenido de biodiesel en la mezcla, esto se debe a la relación mayor para el biodiesel puro que para el diesel. Estos valores dependerán de la composición del diesel usado en la mezcla.

#### 7.4 Aire teórico requerido para la combustión

El cálculo se basa en las siguientes reacciones:



Por ejemplo, para 1 kg de mezcla B10, que como de acuerdo a los datos mostrados en la Figura 7.3 contiene 0,8514 kg de C, 0,1548 kg de H y 0,0408 kg de O, se procedió de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} O_2 \text{ teórico} &= 0,8514 \text{ kgC} \left( \frac{32 \text{ kgO}}{12 \text{ kgC}} \right) + 0,1361 \text{ kg H} \frac{1}{4} \left( \frac{32 \text{ kgO}}{1 \text{ kgH}} \right) + 0,0009 \text{ kgS} \left( \frac{32 \text{ kgO}}{32 \text{ kgS}} \right) - 0,0116 \text{ kgO} \\ &= 3,348 \text{ kg } O_2 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que el aire atmosférico contiene un 23,1% en peso de  $O_2$ , se calcula la cantidad de aire teórico:

$$\text{Aire teórico} = 3,348 \text{ kg } O_2 \times \left( \frac{1 \text{ kg aire}}{0,231 \text{ kg } O_2} \right) = 14,495 \text{ kg aire}$$

Se resumen los resultados en la Tabla 7.11.

**Tabla 7.11. Aire teórico requerido por las mezclas biodiesel-diesel.**

Mezcla	Diesel	B5	B10	B15	B20	B25	B100
kg $O_2$ /kg combustible	3,401	3,376	3,348	3,325	3,300	3,275	2,910
kg aire/kg combustible	14,724	14,614	14,495	14,395	14,286	14,178	12,596

El valor obtenido para el B100 es comparable al reportado por Zheng et al. (95) que obtuvieron relaciones de aire teórico de 12,34, 12,44 y 12,54 kg de aire por kg de combustible para el biodiesel de soya, canola y aceite de frituras respectivamente.

## 7.5 Viscosidad

### 7.5.1 Viscosidad del biodiesel de palma

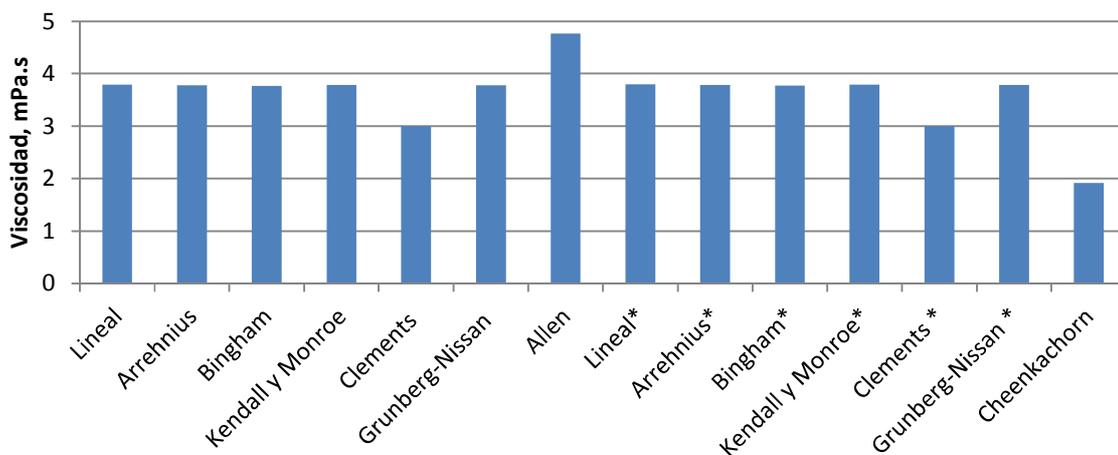
En este trabajo se usaron las ecuaciones 5.8 a la 5.13 reemplazando las fracciones másicas y molares. Adicionalmente se evaluó la densidad usando las aproximaciones de Allen y Cheenkachorn descritas en las ecuaciones 5.14 y 5.15.

Para estimar la viscosidad del biodiesel de palma usando estas ecuaciones se requiere su composición molar y másica y la viscosidad dinámica de sus componentes a 40°C que se tomaron de Knothe et al. (96), y que se muestran en la Tabla 7.12.

**Tabla 7.12. Viscosidad del biodiesel y sus componentes**

Componente	$\mu$ (mPa . s)	Fracción molar	Fracción másica
Metil palmitato	3,723	0,472	0,450
Metil miristato	2,861	0,012	0,010
Metil estereato	4,973	0,038	0,040
Metil oleato	3,924	0,382	0,400
Metil linoleato	3,245	0,096	0,100

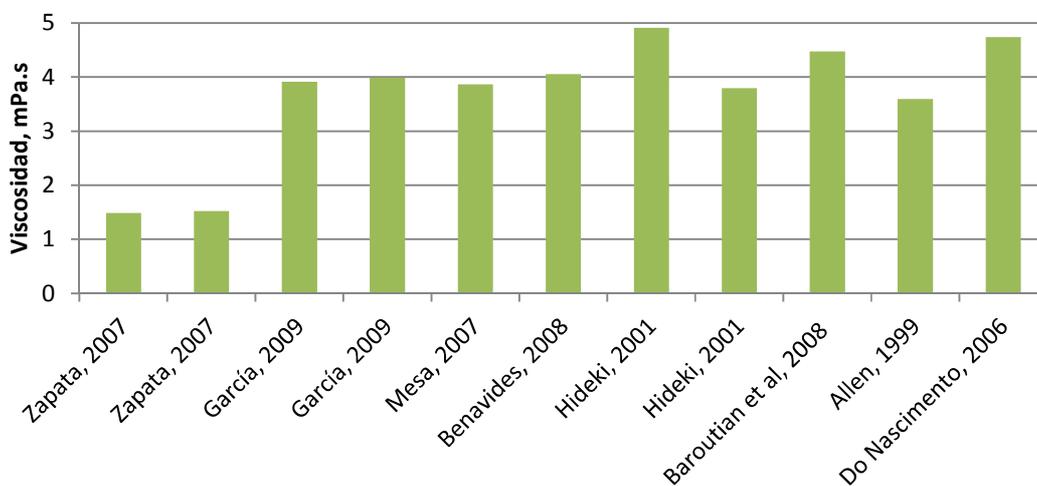
Los resultados de estas estimaciones se muestran en la Figura 7.5. Realizando un análisis estadístico, se observa que el 95% de los valores se encuentran en el intervalo  $3,608 \pm 0,366$ . Para seleccionar los modelos mejor ajustados, se requiere comparar con datos experimentales.



**Figura 7.5. Viscosidad estimada para el biodiesel de palma**

\* Estimaciones realizadas con las fracciones másicas.

Varios autores han reportado valores experimentales para la viscosidad del biodiesel, estos datos se muestran en la Figura 7.6.



**Figura 7.6. Viscosidad reportada para el biodiesel de palma**

El 95% de estas mediciones se encuentra en el rango  $3,376 \pm 0,738$ . La mayoría de las correlaciones usadas en la estimación de la viscosidad del biodiesel se encuentran dentro de este

rango. El modelo que mejor se ajusta a los valores experimentales es el de Clements, tanto con la fracción másica, como con la fracción molar con errores de 3,95 y 3,99% respectivamente.

### 7.5.2 Viscosidad de las mezclas biodiesel – diesel

Usando el mismo procedimiento anterior y tomando una viscosidad a 40°C para el diesel de 2,5 mPa.s reportada por Ortiz (97), se determinó la viscosidad de las mezclas biodiesel – diesel. Los resultados se muestran en la Figura 12. El modelo que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el de Clements usando fracción másica con un error del 2,8%. La viscosidad aumenta al incrementarse el contenido de biodiesel en la mezcla debido al aumento del contenido de oxígeno en la molécula. Por otro lado, el grupo carbonilo C=O presente en los metilésteres es un fuerte aceptor de electrones que le da polaridad a la molécula.

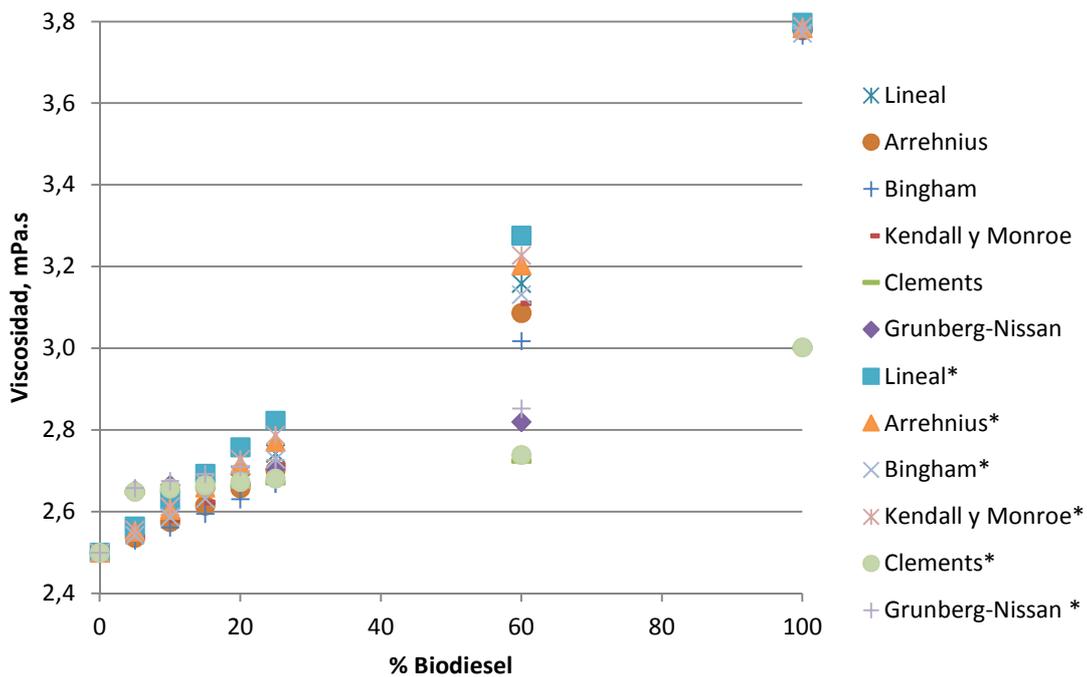
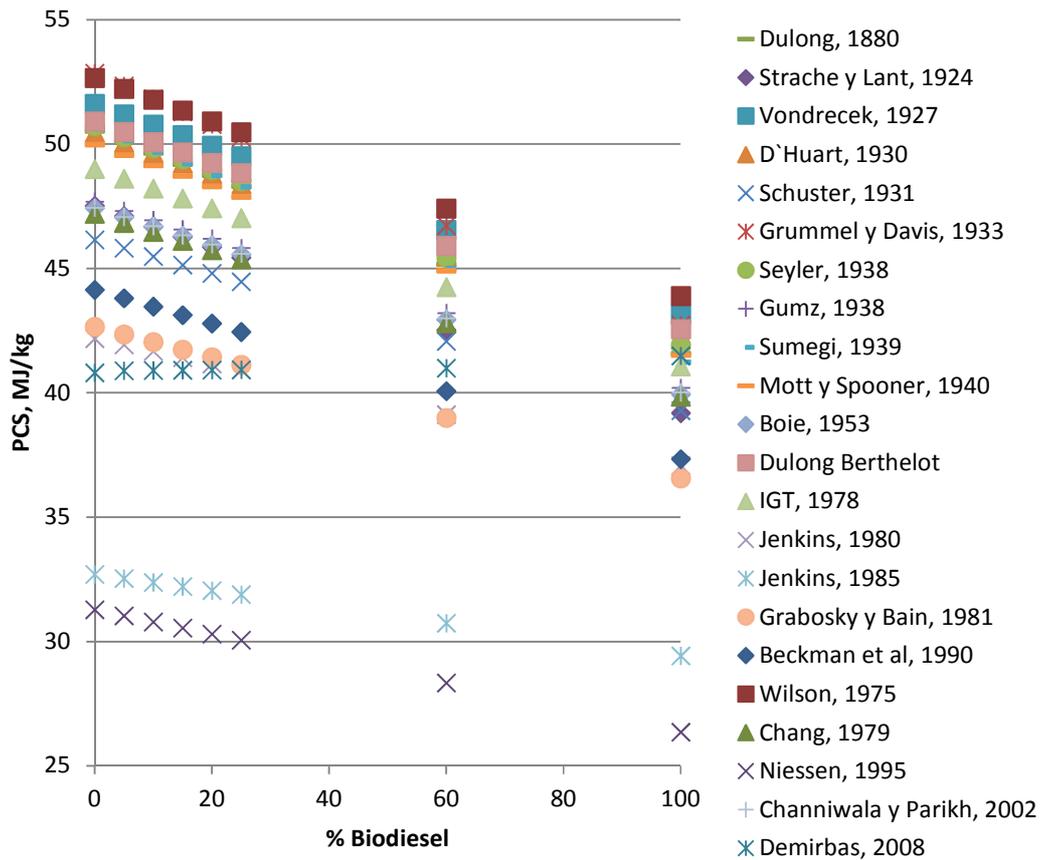


Figura 12. Viscosidad estimada y experimental de mezclas de biodiesel – diesel.

\* Estimaciones realizadas con las fracciones másicas.

## 7.6 Poder calorífico

La estimación del poder calorífico superior para cada una de las mezclas se realizó teniendo en cuenta las ecuaciones 5.17 a la 5.38. Estas ecuaciones se basan en el análisis elemental másico del combustible. Los resultados se muestran en la Figura 7.8.



**Figura 7.8. Poder calorífico superior estimado de las mezclas biodiesel – diesel**

En determinaciones experimentales, para el B100, Benavides et al. (86) reportan un PCS de 39,84 MJ/kg para el biodiesel de palma, otros estudios sobre la determinación de propiedades del biodiesel de palma reportan valores de PCS de 35,2 MJ/kg (27) y 38,01 MJ/kg (88)). Do Nascimento (94) reportó el poder calorífico superior de diferentes mezclas de biodiesel de palma. De los modelos analizados, el que mejor se ajusta a los datos experimentales es el de Shuster con desviación promedio de 1,28%. Estos valores se muestran en la

Figura 13.9.

En todos los modelos es evidente que el aumento en el contenido de biodiesel en la mezcla disminuye el poder calorífico, lo cual es de esperarse si se tiene en cuenta el menor contenido de carbono en el biodiesel en comparación con el diesel.

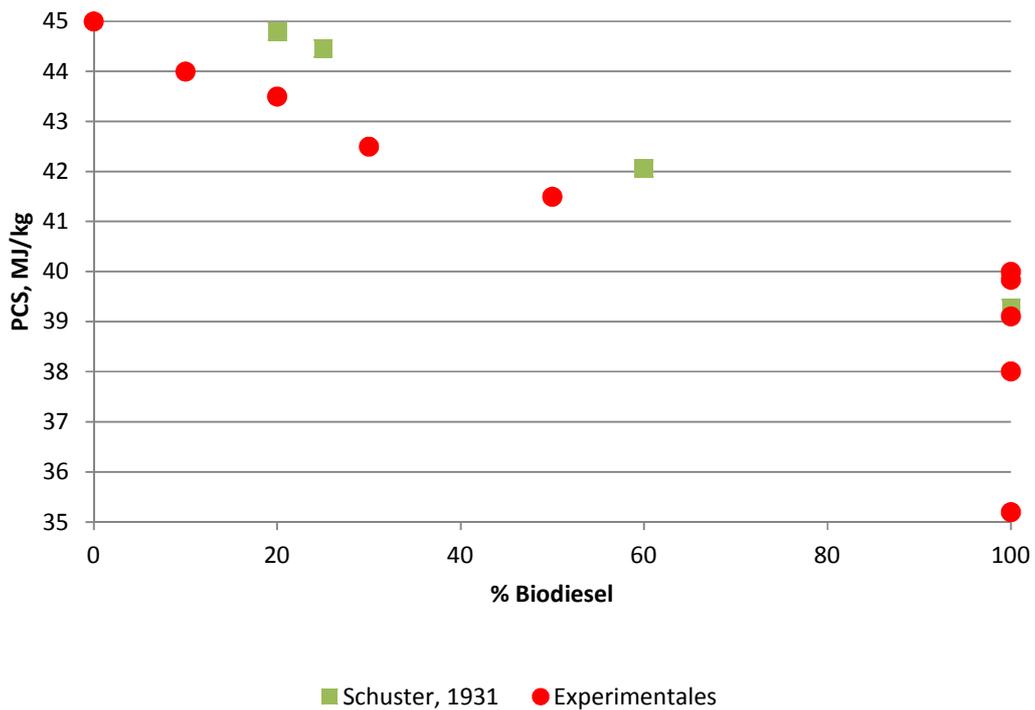


Figura 13.9. Poder calorífico superior estimado y reportados para mezclas biodiesel – diesel

### 7.7 Número de cetano

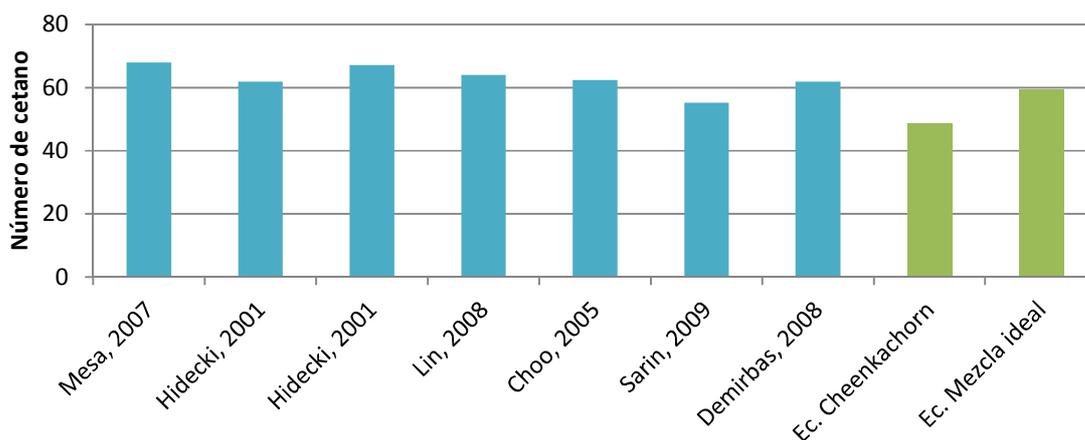
Los valores de número de cetano de los metilésteres del biodiesel se tomaron de Bangboye et al. (98) y se muestran en la Tabla 7.112. Para calcular el número de cetano del biodiesel se usó la regla de las mezclas y la correlación propuesta por Cheenkachorn (52) y descrita en la Ecuación 5.43.

Tabla 7.112. Número de cetano de los componentes del biodiesel

Metilester	% peso	Número de cetano	Fórmula abreviada
Metil palmitato	45%	74,5	C16:0

Metil miristato	1%	66,2	C14:0
Metil estereato	4%	86,9	C18:0
Metil oleato	40%	47,2	C18:1
Metil linoleato	10%	28,5	C18:2

Los resultados para el número de cetano del biodiesel de palma comparado con lo reportado por varios autores se muestran en la Figura 7.10.



**Figura 7.10. Número de cetano estimado y reportado para el biodiesel de palma**

La correlación de Cheenkachorn tiene una desviación con respecto a los datos experimentales del 22,3%, mientras que la ecuación de las mezclas ideales se desvía sólo en un 5,3%, por lo cual, ésta última es la usada para estimar el número de cetano de las mezclas de biodiesel y diesel, usando un número de cetano de 45 para éste último, de acuerdo a lo reportado por Lin (99).

Los resultados del número de cetano de las mezclas se muestran en la Figura 14 y se comparan con los valores experimentales reportados. Se observa la misma tendencia en aumentar el número de cetano con el incremento del contenido de biodiesel en las mezclas.

La desviación promedio entre los valores estimados y los experimentales reportados calculada con la Ecuación 5.54 es del 0,2%.

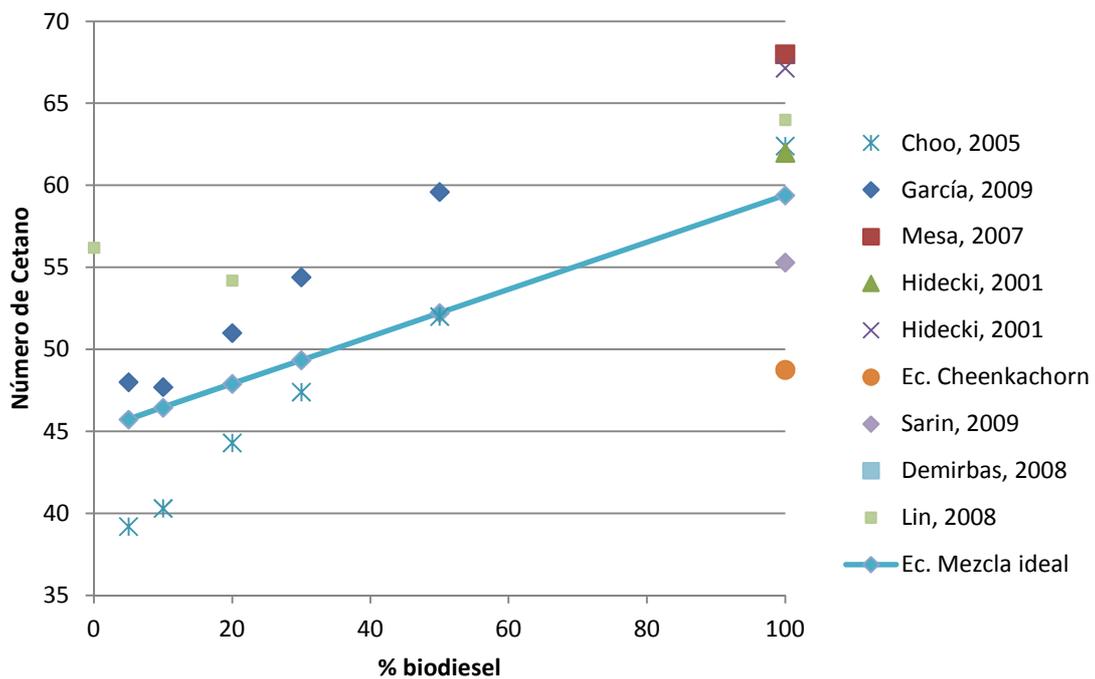


Figura 14. Número de cetano de mezclas biodiesel – diesel

### 7.8 Punto de nube del biodiesel de palma

Usando la correlación propuestas por Imahara et al. (100) y por Sarin et al. (70), las fracciones másicas de la Tabla 7.9, se estimó el punto de nube del biodiesel de palma reemplazando en las ecuaciones 5.44, 5.45 y 5.46.

Estos valores se muestran en la Figura, comparándolos con lo reportado por otros autores, como Imahara et al. (42), Sarin et al. (70), Srivastava et al. (89), Hidecki (23), Benavides et al. (86), García et al. (101), Do Nascimento (94), Knothe (14) y Aziz et al. (102). La ecuación que mejor se ajustó fue la propuesta por Imahara, cuya desviación promedio con respecto a los datos experimentales fue de 6,5%.

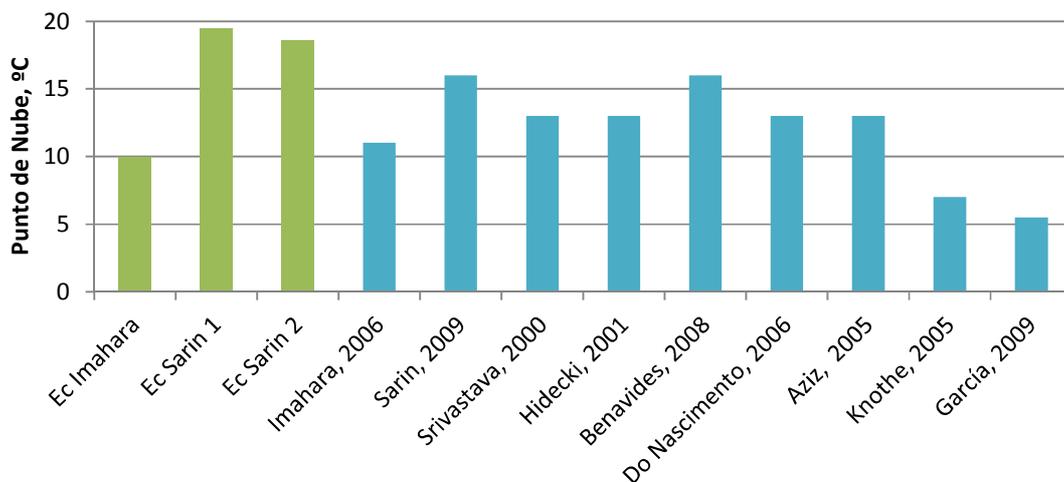


Figura 7.12. Puntos de nube estimados y reportados para el biodiesel de palma

### 7.9 Conductividad térmica

La estimación de la conductividad térmica del diesel se evaluó usando la Ecuación 5.39 y la del biodiesel y las mezclas biodiesel - diesel se realizó de acuerdo a las Ecuaciones 5.40, 5.41 y 5.42.

Los resultados se muestran en la Figura 157.13.

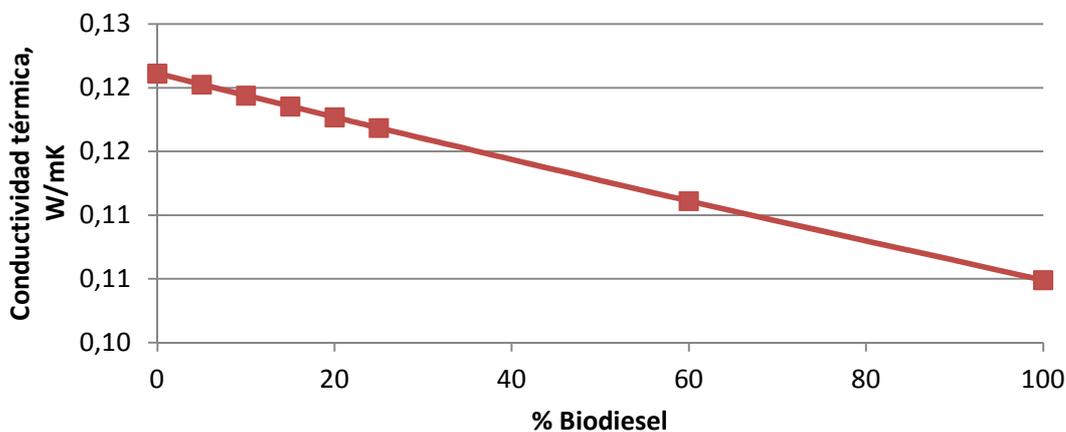


Figura 15. Conductividad térmica de mezclas biodiesel – diesel

La conductividad térmica de las mezclas disminuye al aumentar el contenido de biodiesel en la mezcla debido a que su conductividad es menor que la del diesel seleccionado para este estudio.

## 7.10 Capacidad calorífica

### 7.10.1 Capacidad calorífica del biodiesel de palma

Usando la Ecuación 5.49 y la Ecuación 5.50 y los pesos moleculares de cada metiléster, se calcularon sus capacidades caloríficas a 25°C. Aplicando la regla de las mezclas, se calculó la capacidad calorífica del biodiesel de palma. Los resultados se muestran en la Tabla 7.14.

**Tabla 7.14. Capacidad calorífica de los metilésteres y el biodiesel de palma**

Metiléster	PM	C <sub>p</sub> , J/g K <sup>*</sup>	C <sub>p</sub> , J/g K <sup>**</sup>	X masa
Metil palmitato	270	1,820	2,099	0,45
Metil miristato	242	1,831	2,088	0,01
Metil estereato	298	1,809	2,108	0,04
Metil oleato	296	1,810	2,108	0,40
Metil linoleato	294	1,811	2,107	0,10
<b>Biodiesel</b>		<b>1,815</b>	<b>2,104</b>	

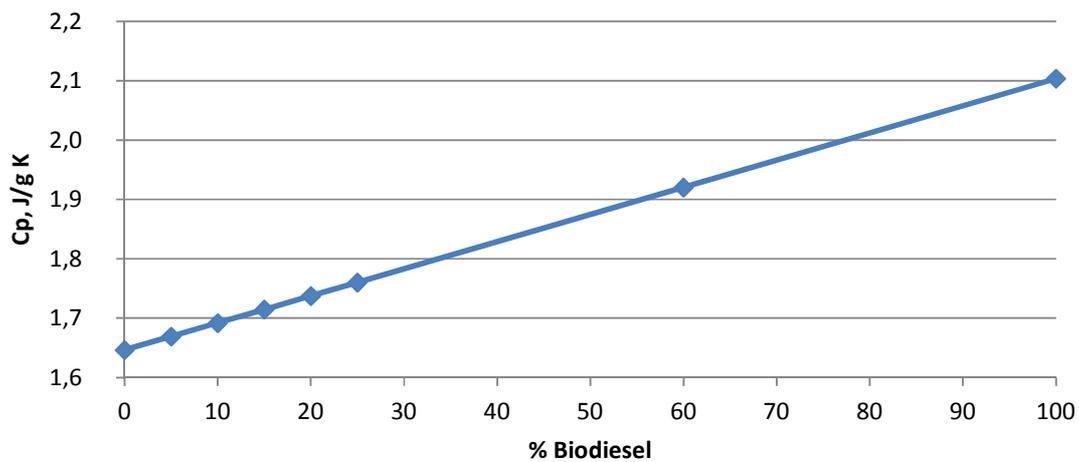
\*Ecuación 5.49. \*\*Ecuación 5.50

En la literatura Dzida y Prusakiewicz (103) reportaron para el biodiesel a 25°C una capacidad calorífica de 1,98 J/g K. Al comparar este valor con los estimados, se encuentra un error de 8,6% para la Ecuación 49 y de 5,9% para la Ecuación 5.50. Por lo tanto se considera que la Ecuación 5.50 es la apropiada para estimar la capacidad calorífica del biodiesel.

### 7.10.2 Capacidad calorífica de las mezclas biodiesel – diesel.

La capacidad calorífica del diesel se estimó a partir de las constantes de  $C_p$  para el  $C_{14}H_{30}$  tabuladas por Reid et al. (64):  $A = -10,98$ ,  $B = 1,33$ ,  $C = -0,000742$  y  $D = 1,59 \times 10^{-7}$ . Reemplazando en la Ecuación 5.48 se obtiene  $C_p = 1,65$  para el diesel del petróleo.

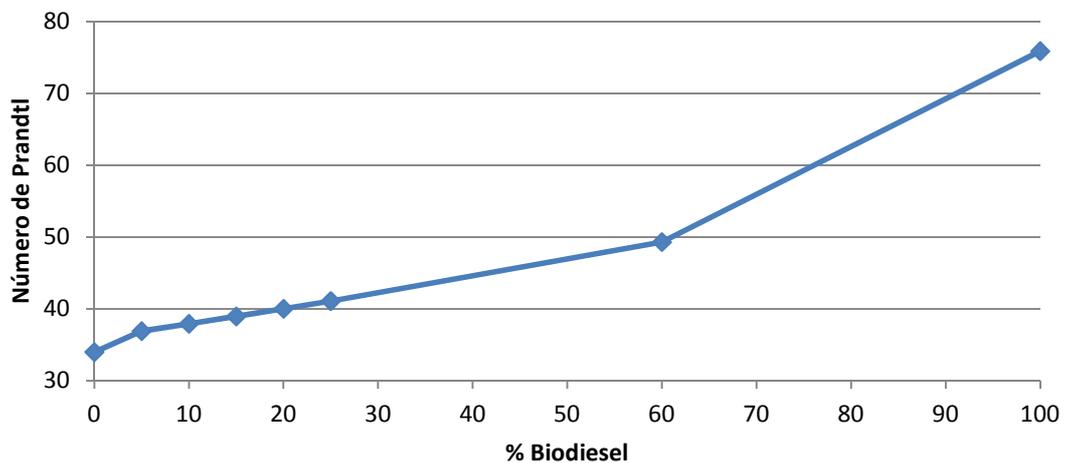
La capacidad calorífica de las mezclas se calculó de acuerdo a la Ecuación 5.51, y se muestran en la Figura 7.14.



**Figura 7.14. Capacidad calorífica de mezclas biodiesel – diesel**

### 7.11 Numero de Prandtl

Reemplazando en la Ecuación 5.52 los valores estimados de viscosidad dinámica, conductividad térmica y capacidad calorífica a 20°C, se calcularon los números de Prandtl para cada una de las mezclas, y se muestran en la Figura 7.15.



**Figura 7.15. Número de Prandtl de las mezclas biodiesel – diesel**

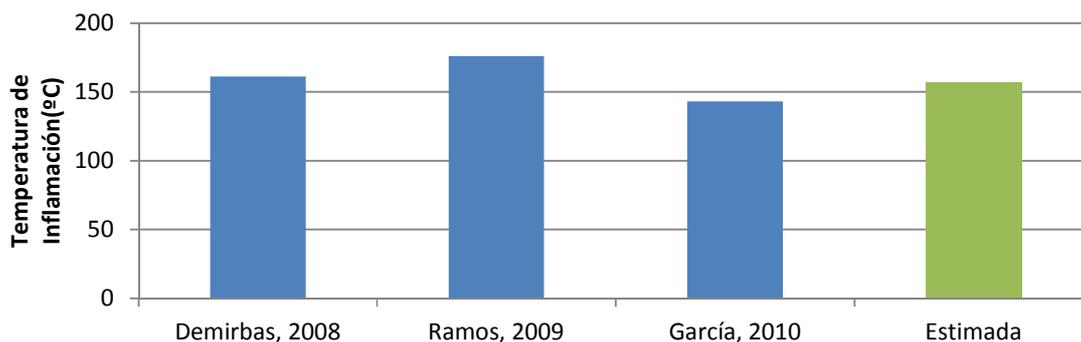
## 7.12 Temperatura de inflamación

Usando la Ecuación 5.53 se determinó la temperatura de inflamación de los componentes del biodiesel y con la composición másica conocida, y usando la Ecuación 5.1, se determinó el Temperatura de Inflamación del biodiesel de palma. El resumen de los cálculos se presenta en la Tabla 7.15.

**Tabla 7.15. Temperatura de Inflamación de los metilésteres y del biodiesel de palma**

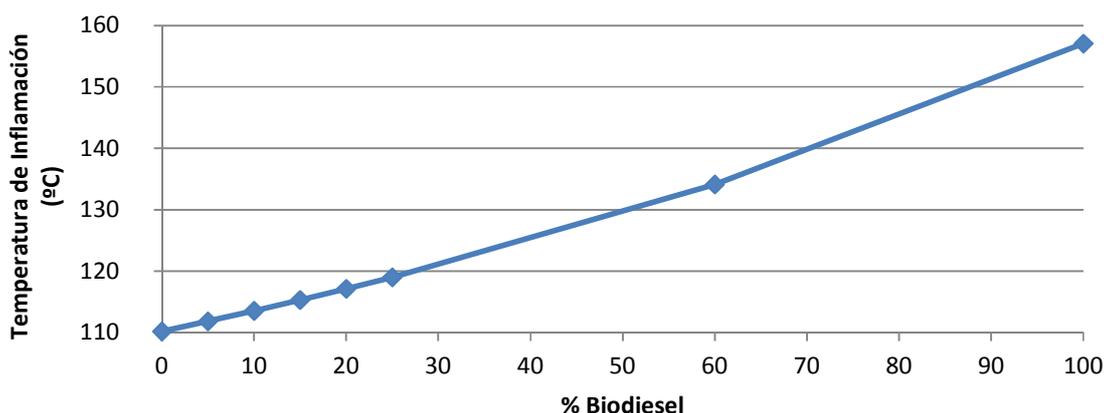
Componente	% peso	z	Tb (K)	FP(K)	FP(C)
Metil palmitato	45%	17	691	515,50	242,50
Metil miristato	1%	15	568	415,67	142,67
Metil estereato	4%	19	716	532,38	259,38
Metil oleato	40%	19	491,6	345,86	72,86
Metil linoleato	10%	19	488	342,95	69,95
Biodiesel	100%			430,06	157,06

Algunos autores reportaron el Temperatura de Inflamación para el biodiesel de palma: García et al. (47) determinaron experimentalmente un valor de 143°C, Demirbas (15) reportó 161°C y Ramos et al. (48) encontraron un Temperatura de Inflamación de 176. La desviación promedio con respecto a estos valores es de 1,83% y se muestra en la siguiente figura:



**Figura 7.16. Temperatura de Inflamación del biodiesel de palma estimado y reportado**

La Figura 7.17 muestra la temperatura de inflamación de las mezclas biodiesel – diesel, y se observa un incremento en la temperatura de inflamación a medida que aumenta el porcentaje de biodiesel en la mezcla, por lo cual se ha considerado que el biodiesel es más seguro que el diesel y las mezclas se hacen más seguras a medida que tienen mayor contenido de biodiesel.



**Figura 7.17. Temperatura de Inflamación de las mezclas biodiesel - diesel**

La Tabla 7.1613 reúne las desviaciones promedio calculadas de los valores estimados con respecto a los valores experimentales de acuerdo a la Ecuación 5.54. Se observó un buen ajuste para la densidad y el número de cetano, desviaciones mayores al 5% para la capacidad calorífica y la viscosidad cinemática y desviación muy alta para el punto de nube. Debe tenerse en cuenta que la variabilidad de los valores experimentales encontrados es alta, sobre todo para el punto de nube.

**Tabla 7.1613. Desviación promedio respecto a los datos experimentales**

Propiedad	Desviación promedio %
Densidad	1,4
Viscosidad dinámica a 40°C	7,4
Poder calorífico superior	5,1
Punto de nube	17,0
Número de cetano	4,9
Capacidad calorífica a 25°C	5,9
Temperatura de Inflamación	1,8

## 8. SIMULACION DE LA COMBUSTION DE LAS MEZCLAS ETANOL – GASOLINA

### 8.1 Productos de la combustión

Tomando como base de cálculo 1 kg de mezcla de bioetanol y gasolina, se calcularon los kg de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> a partir de los cálculos estequiométricos para diferentes relaciones de exceso de aire ( $\lambda$ ). Estos resultados se muestran en las figuras siguientes:

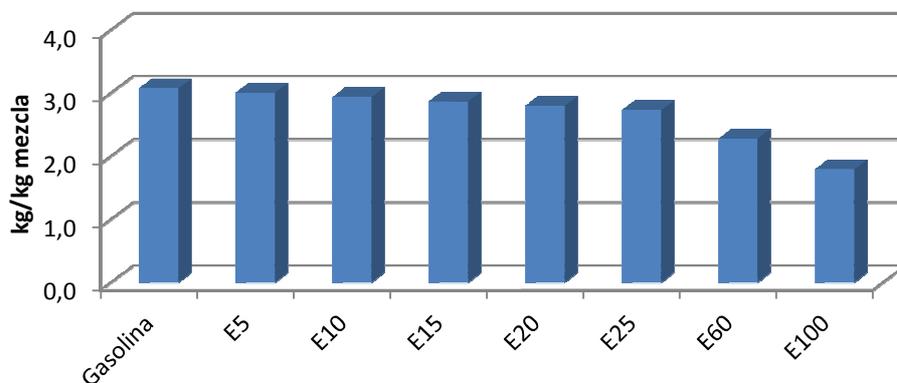
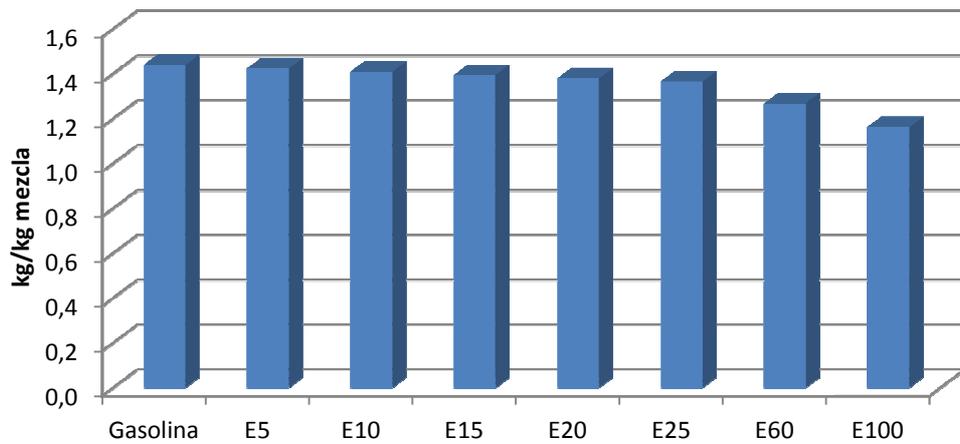


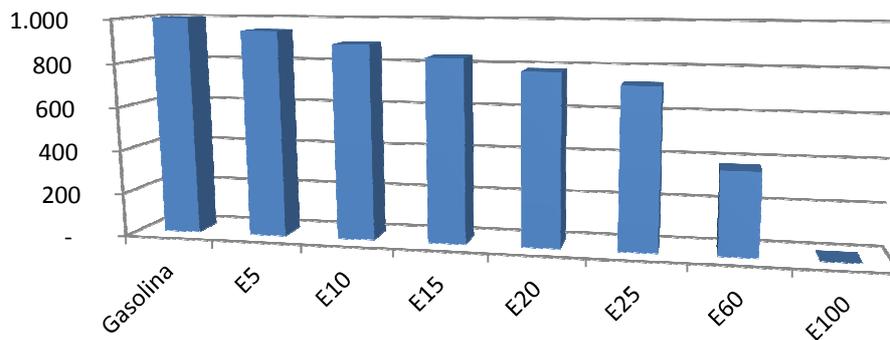
Figura 8.1. Emisiones de CO<sub>2</sub> para cada mezcla

La disminución de la cantidad de CO<sub>2</sub> producido al aumentar el contenido de etanol en la mezcla se debe al menor contenido de carbono en el etanol con respecto a la gasolina, de manera que al incrementar el contenido de etanol en la mezcla, disminuye el contenido de carbono, y como consecuencia la generación de CO<sub>2</sub>. Este hecho confirma que el uso del etanol favorece la reducción del efecto invernadero, porque por un lado se produce menos CO<sub>2</sub>, y adicionalmente el CO<sub>2</sub> producido a causa de la combustión del etanol se incorpora al ciclo del carbono rápidamente debido a que a diferencia de la gasolina, proviene de fuentes renovables.



**Figura 8.2 Emisiones de vapor de H<sub>2</sub>O para cada mezcla**

El vapor de agua generado en la combustión está relacionado con el hidrógeno presente en el combustible. Debido a que la gasolina contiene mayor contenido de hidrógeno que el etanol, a medida que aumenta la cantidad de etanol en la mezcla, la producción de agua en los productos de combustión disminuye. Esto favorece la reducción del efecto invernadero debido a que el vapor de agua es un GEI de alta potencia.



**Figura 8.3. Emisiones de SO<sub>2</sub> para cada mezcla**

El azufre no se encuentra normalmente en el etanol, y su presencia en los combustibles fósiles es uno de los principales problemas que presenta la combustión de este tipo de combustibles. Con el

incremento de etanol en la mezcla, disminuye la cantidad de  $\text{SO}_2$  producida durante la combustión, con lo cual se favorece la reducción de la generación de lluvia ácida que es uno de los principales problemas asociados con este gas.

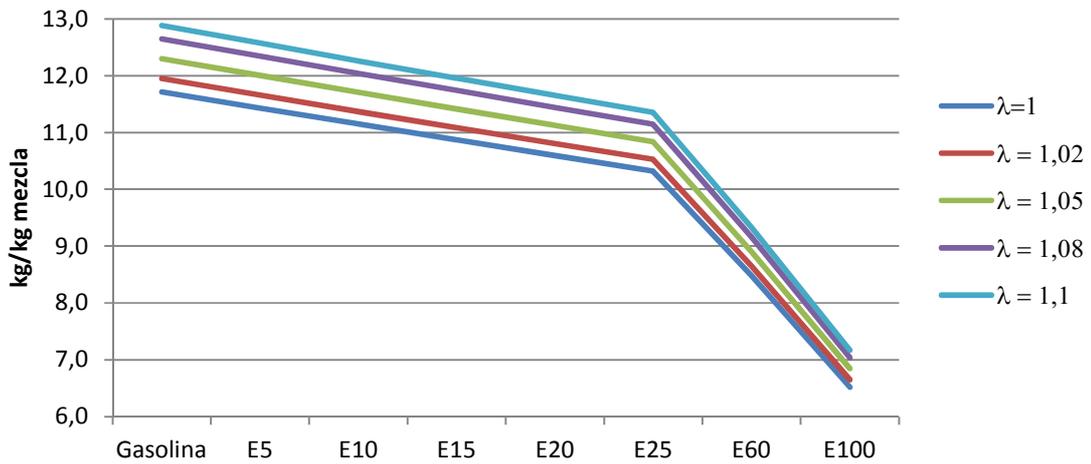


Figura 8.4. Emisiones de  $\text{N}_2$  para cada mezcla y relaciones de exceso de aire

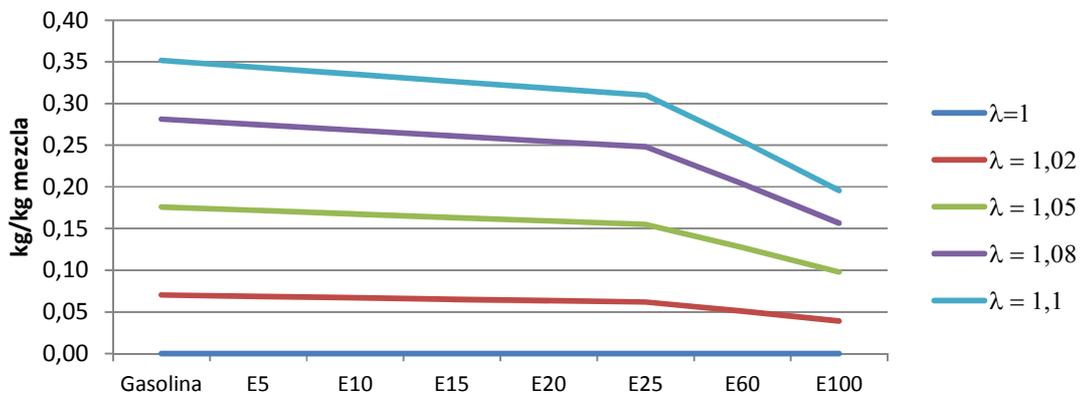


Figura 8.516. Emisiones de  $\text{O}_2$  para cada mezcla y relaciones de exceso de aire

El oxígeno y nitrógeno en los productos de combustión dependen de la cantidad de aire alimentado. Estos gases se muestran en las Figura 8.4 y Figura 8.516. Se observa una disminución de la cantidad de nitrógeno y oxígeno al aumentar el contenido de etanol en la mezcla, dado que el aire requerido es menor, y por lo tanto la cantidad alimentada de aire también disminuye. Esta

disminución es más evidente en el nitrógeno que en el oxígeno dado que no reacciona en la combustión y que se encuentra en mayor proporción en el aire.

## 8.2 Capacidad calorífica

Conocida la composición de la mezcla de gases y usando la Ecuación 5.55, y con las constantes de cada gas, disponibles en la literatura (82) y que se muestran en la Tabla 8.1 se obtienen las constantes a, b, c, d para calcular la capacidad calorífica de la mezcla a cualquier temperatura.

**Tabla 8.1. Constantes para el cálculo de  $C_p$  para los gases de combustión**

	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
a	22,3	32,2	28,9	25,8	25,5
b	59,81	1,92	-1,57	57,95	15,2
c	-35,01	10,55	8,08	-38,12	-7,15
d	7,47	-3,6	-2,87	8,61	1,31

Los resultados para cada mezcla a diferentes relaciones de exceso de aire se muestran para una temperatura de 400K en la Figura 8.6. Se observa un aumento a mayor contenido de bioetanol debido a que la fracción de vapor de agua aumenta. Mayores relaciones de exceso de aire disminuyen la capacidad calorífica debido a que el aumento de nitrógeno y oxígeno en la mezcla, disminuyen la fracción de vapor de agua.

Se observa un aumento en la capacidad calorífica de los productos de la combustión a medida que aumenta el contenido de bioetanol en las mezclas. Esto se debe a que al aumentar la proporción de etanol, aumenta también la fracción molar de vapor de agua en los gases de combustión. El vapor de agua es el componente de la mezcla de gases que tiene mayor capacidad calorífica. A medida que se usan mayores excesos de aire en la combustión, la fracción molar de agua disminuye porque aumenta la presencia de oxígeno y nitrógeno en la mezcla, cuyas capacidades caloríficas son menores que la del vapor de agua.

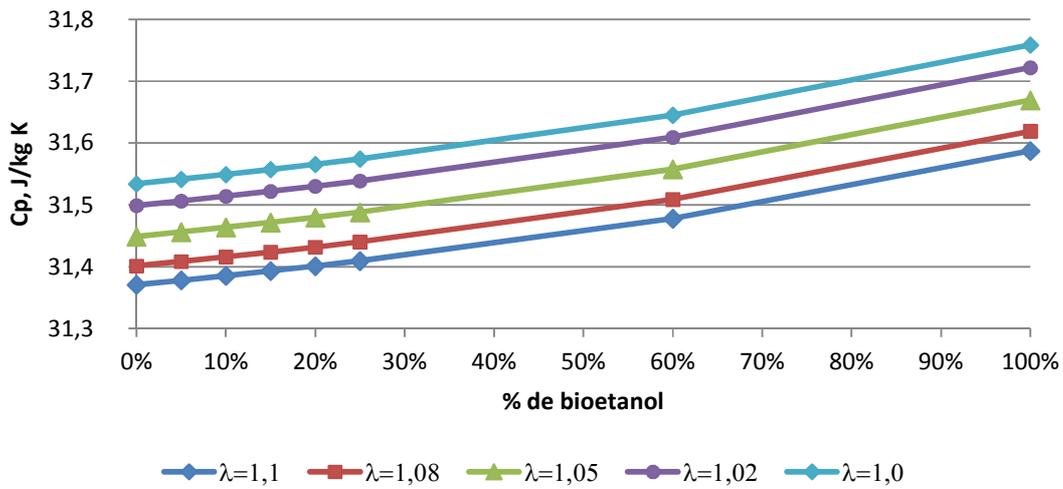


Figura 8.6. Capacidad calorífica a 400K de los productos de la combustión

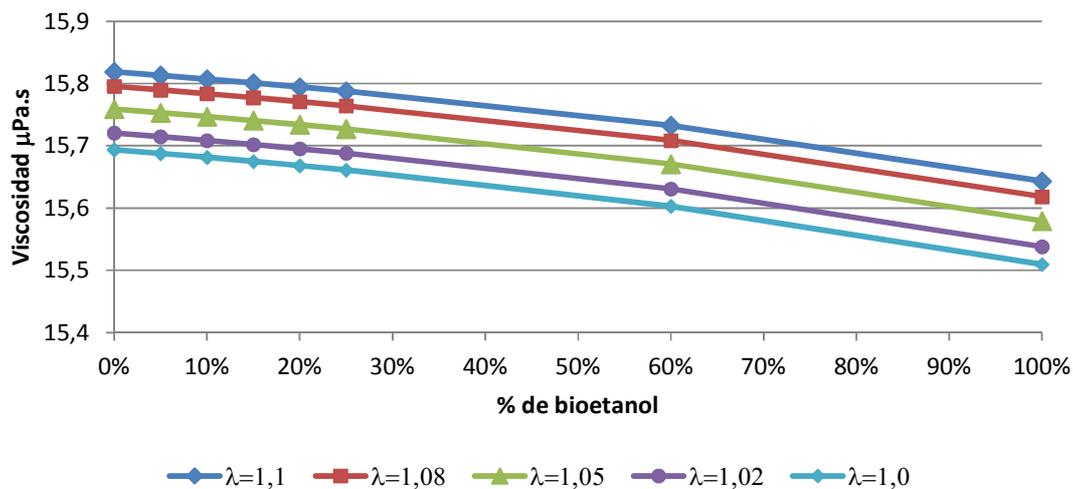
### 8.3 Viscosidad

La viscosidad de la mezcla de los productos de combustión a 0°C se estimó con la Ecuación 56 y con los datos disponibles en la literatura (82) y que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Viscosidad de los gases de combustión

	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
$\mu$ ( $\mu$ P.s) a 0°C	14	12,1	16,6	11,6	19,1

Los resultados se grafican en la Figura 17. La viscosidad disminuye de manera inversa a la capacidad calorífica. El aumento de aire en exceso ocasiona un aumento en la viscosidad debido a que de todos los gases puros, el oxígeno es el que tiene la mayor viscosidad. A mayores contenidos de bioetanol, se requiere menor cantidad de aire, por lo tanto la alimentación de aire en exceso es menor, y como consecuencia hay menos cantidad de oxígeno en los gases de salida.



**Figura 17. Viscosidad de los productos de combustión**

El incremento de etanol en la mezcla disminuye la viscosidad de la mezcla dado que el contenido de oxígeno y nitrógeno que son los gases de mayor viscosidad disminuyen. De igual forma, al disminuir la relación de exceso de aire, habrá menos oxígeno y nitrógeno en los gases de combustión, y disminuye la viscosidad.

#### 8.4 Conductividad térmica

La estimación de la conductividad térmica de las mezclas de gases se realizó usando la Ecuación 5.57 y con los datos disponibles en la literatura (82) y que se muestran en la Tabla 8.15.

**Tabla 8.15. Conductividad térmica de los gases de combustión**

	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
k (W/ms) a 0°C	0,015	0,025	0,024	0,009	0,024

Estos resultados se presentan en la Figura 18. El aumento en el aire en exceso y en el contenido de bioetanol en la mezcla de biocombustible ocasiona un incremento en la conductividad térmica de los gases de combustión.

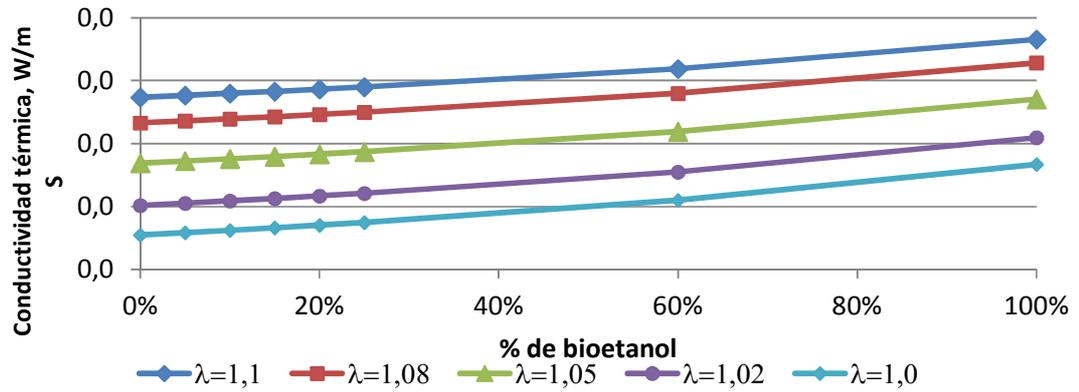


Figura 18. Conductividad de los productos de combustión

### 8.5 Número de Prandtl

El número de Prandtl se calculó a 0°C usando los valores calculados de capacidad calorífica, conductividad térmica y viscosidad para las diferentes relaciones de aire en exceso usadas y la Ecuación 5.52. Se grafican los resultados en la Figura 8.9. Se observa un comportamiento descendente con el aumento de la cantidad de aire teórico y el etanol en la mezcla.

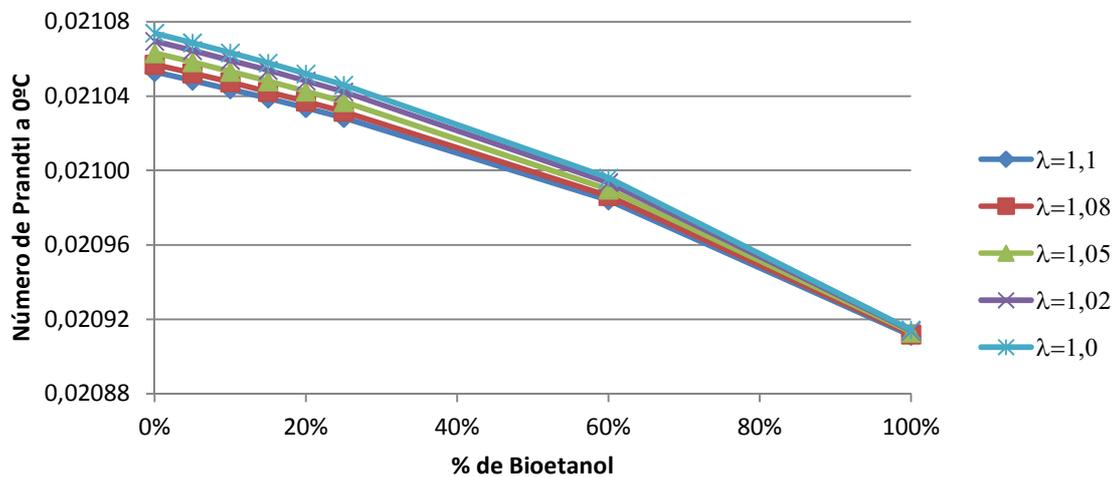
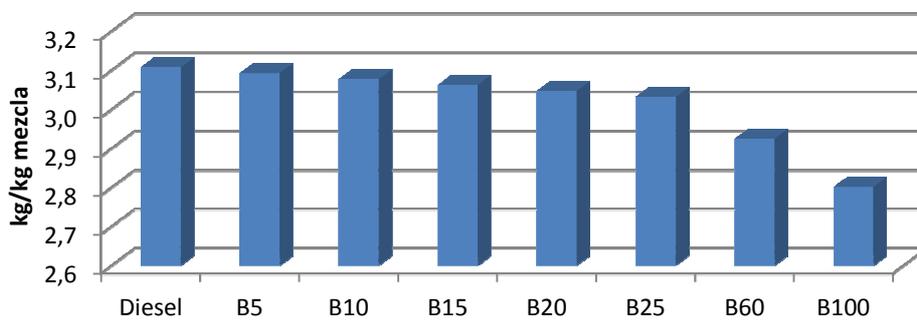


Figura 8.9. Número de Prandtl de los productos de combustión

## 9. SIMULACION DE LA COMBUSTION DE LAS MEZCLAS BIODIESEL – DIESEL

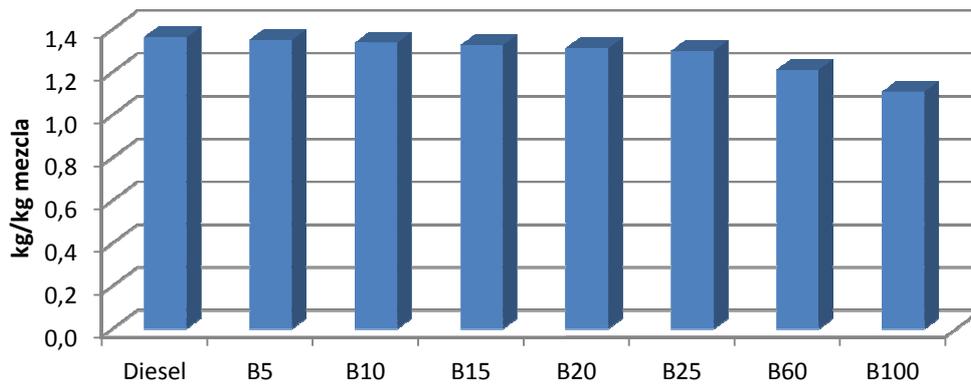
### 9.1 Productos de la combustión

Tomando como base de cálculo 1 kg de mezcla de biodiesel y diesel, se calcularon los kg de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> a partir de los cálculos estequiométricos para diferentes relaciones de exceso de aire ( $\lambda$ ). Estos resultados se muestran en las figuras siguientes:



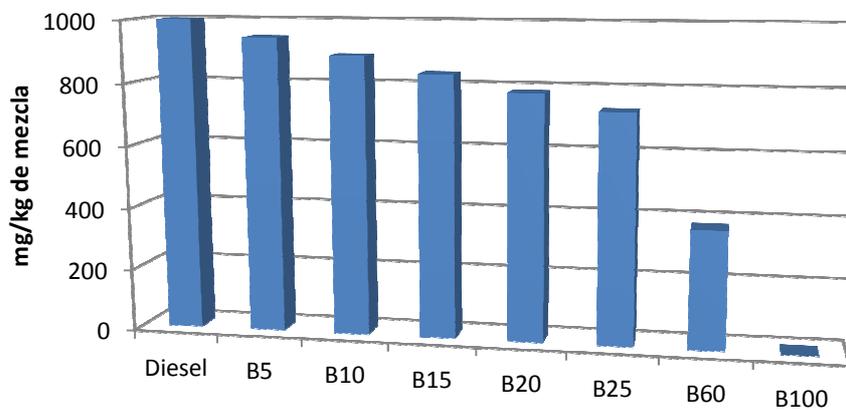
**Figura 9.1. Emisiones de CO<sub>2</sub> para cada mezcla**

La disminución de la cantidad de CO<sub>2</sub> producido al aumentar el contenido de biodiesel en la mezcla se debe al menor contenido de carbono en el biodiesel con respecto al diesel, de manera que al incrementar el contenido de biodiesel en la mezcla, disminuye el contenido de carbono, y como consecuencia la generación de CO<sub>2</sub>. Este hecho confirma que el uso del biodiesel favorece la reducción del efecto invernadero, porque por un lado se produce menos CO<sub>2</sub>, y adicionalmente el CO<sub>2</sub> producido a causa de la combustión del biodiesel se incorpora al ciclo del carbono rápidamente debido a que el biodiesel a diferencia del diesel, proviene de fuentes renovables.



**Figura 19. Emisiones de vapor de H<sub>2</sub>O para cada mezcla**

El vapor de agua generado en la combustión está relacionado con el hidrógeno presente en el combustible. Debido a que el diesel contiene mayor contenido de hidrógeno que el biodiesel, a medida que aumenta la cantidad de biodiesel en la mezcla, la producción de agua en los productos de combustión disminuye. Esto favorece la reducción del efecto invernadero debido a que el vapor de agua es un GEI de alta potencia.



**Figura 9.3. Emisiones de SO<sub>2</sub> para mezclas biodiesel - diesel**

El azufre no se encuentra normalmente en el biodiesel, y su presencia en el diesel es uno de los principales problemas que presenta la combustión de este combustible. Con el incremento de biodiesel en la mezcla, disminuye la cantidad de SO<sub>2</sub> producida durante la combustión, con lo cual

se favorece la reducción de la generación de lluvia ácida que es uno de los principales problemas asociados con este gas.

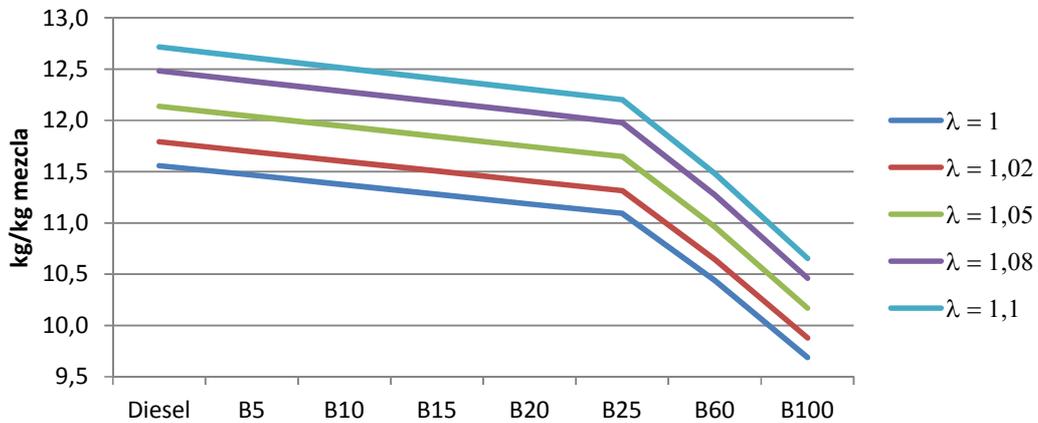


Figura 9.4. Emisiones de  $N_2$  para cada mezcla y relaciones de exceso de aire

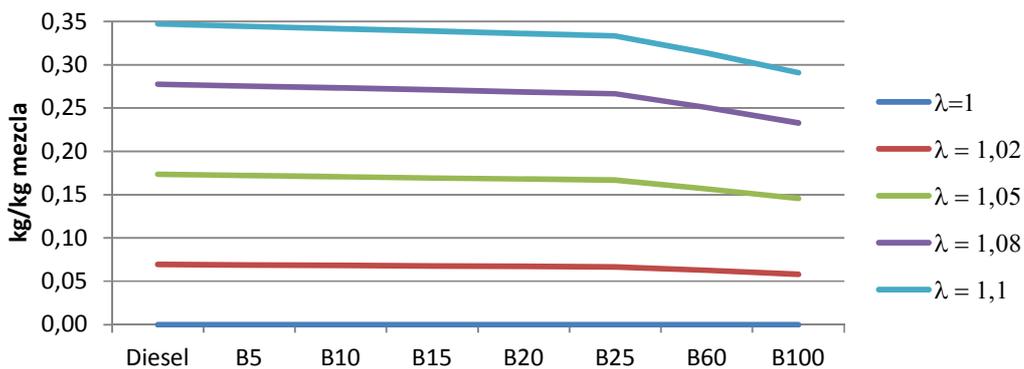
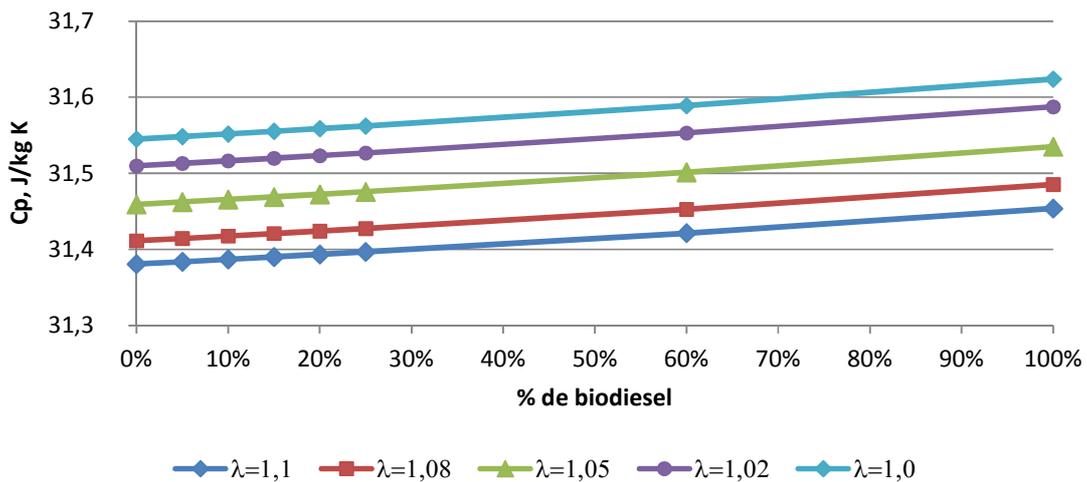


Figura 9.5. Emisiones de  $O_2$  para cada mezcla y relaciones de exceso de aire

El oxígeno y nitrógeno en los productos de combustión dependen de la cantidad de aire alimentado. Estos gases se muestran en las Figura 9.4 y Figura 9.5. Se observa una disminución de la cantidad de nitrógeno y oxígeno al aumentar el contenido de biodiesel en la mezcla, dado que el aire requerido es menor, y por lo tanto la cantidad alimentada de aire también disminuye. Esta disminución es más evidente en el nitrógeno que en el oxígeno dado que no reacciona en la combustión y que se encuentra en mayor proporción en el aire.

## 9.2 Capacidad calorífica

Conocida la composición de la mezcla de gases y usando la Ecuación 5.55, y con las constantes de cada gas, disponibles en la literatura (82) y que se muestran en la Tabla 8.1 se obtienen las constantes a, b, c, d para calcular la capacidad calorífica de la mezcla a cualquier temperatura. Los resultados para cada mezcla a diferentes relaciones de exceso de aire se muestran para una temperatura de 400K en la Figura 9.20. Se observa un aumento a mayor contenido de biodiesel debido a que la fracción de vapor de agua aumenta. Mayores relaciones de exceso de aire disminuyen la capacidad calorífica debido a que el aumento de nitrógeno y oxígeno en la mezcla, disminuyen la fracción de vapor de agua.



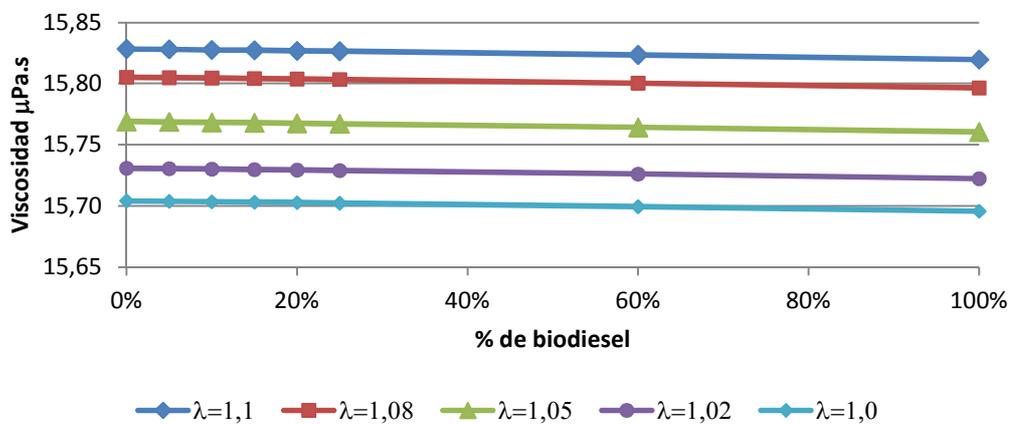
**Figura 9.20. Capacidad calorífica a 400K de los gases de combustión**

Se observa un ligero aumento en la capacidad calorífica de los productos de combustión a medida que aumenta el contenido de biodiesel en las mezclas. Esto se debe a que al aumentar la proporción de biodiesel, aumenta también la fracción molar de vapor de agua en los gases de combustión. El vapor de agua es el componente de la mezcla de gases que tiene mayor capacidad calorífica. A medida que se usan mayores excesos de aire en la combustión, la fracción molar de

agua disminuye porque aumenta la presencia de oxígeno y nitrógeno en la mezcla, cuyas capacidades caloríficas son menores que la del vapor de agua.

### 9.3 Viscosidad

La viscosidad de la mezcla de productos de combustión a 0°C se estimó con la Ecuación 5.56 y con los datos disponibles en la literatura (82) y que se muestran en la Tabla 14. Los resultados se grafican en la Figura 9.7. La viscosidad disminuye de manera inversa a la capacidad calorífica.



**Figura 9.7. Viscosidad de los productos de combustión**

El aumento de aire en exceso ocasiona un aumento en la viscosidad debido a que de todos los gases puros, el oxígeno es el que tiene la mayor viscosidad. A mayores contenidos de bioetanol, se requiere menor cantidad de aire, por lo tanto la alimentación de aire en exceso es menor, y como consecuencia hay menos cantidad de oxígeno en los gases de salida.

El incremento de biodiesel en la mezcla disminuye ligeramente la viscosidad de la mezcla dado que el contenido de oxígeno y nitrógeno que son los gases de mayor viscosidad disminuyen. De igual forma, al disminuir la relación de exceso de aire, habrá menos oxígeno y nitrógeno en los gases de combustión, y disminuye la viscosidad. Sin embargo, el cambio de la viscosidad de los productos

de combustión con relación al contenido de biodiesel o a la relación de exceso de aire usada es pequeño.

#### 9.4 Conductividad térmica

La estimación de la conductividad térmica de las mezclas de gases se realizó usando la Ecuación 5.57 y con los datos disponibles en la literatura (82) y que se muestran en la Tabla 8.15. Estos resultados se presentan en la Figura 21.

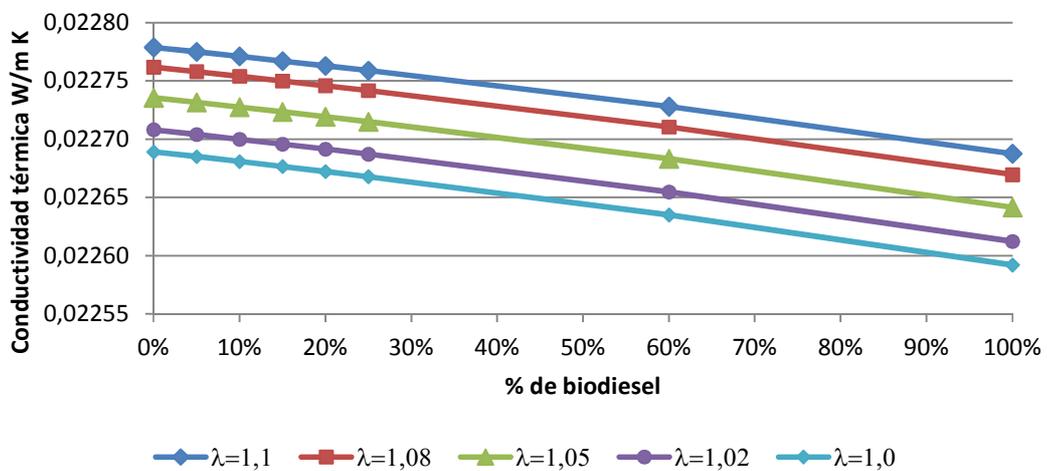


Figura 21. Conductividad de los productos de combustión

El aumento en el aire en exceso ocasiona un incremento en la conductividad térmica de los gases de combustión, mientras que la conductividad disminuye con el aumento del contenido de biodiesel en la mezcla.

#### 9.5 Número de Prandtl

El número de Prandtl se calculó a 0°C usando los valores calculados de capacidad calorífica, conductividad térmica y viscosidad para las diferentes relaciones de aire en exceso usadas y la Ecuación 5.52. Se grafican los resultados en la Figura 22. Se observa un comportamiento

descendente con el aumento de la cantidad de aire teórico y un aumento con el incremento de la proporción de biodiesel en la mezcla.

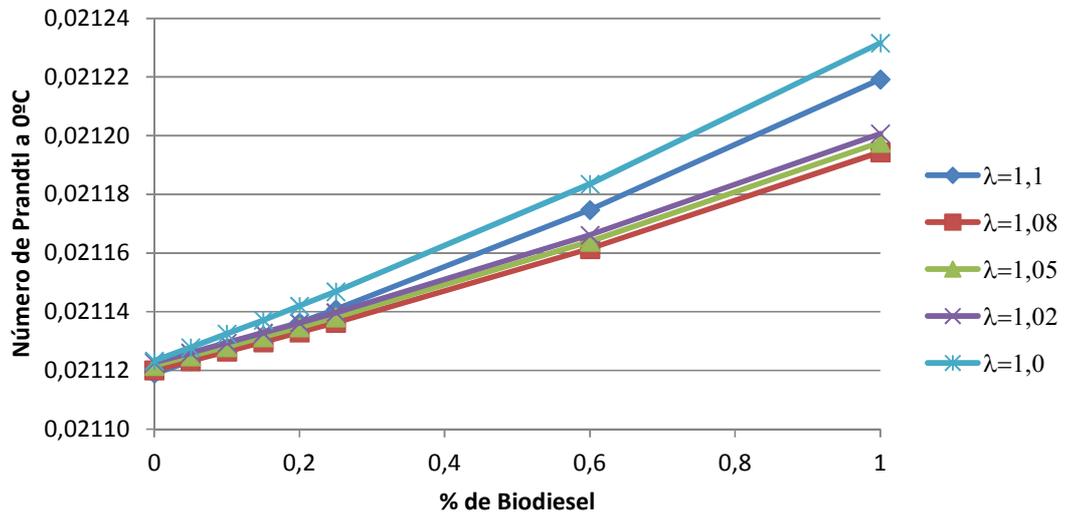


Figura 22. Número de Prandtl de los productos de combustión

## **10. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES Y SUS MEZCLAS**

Una forma de cuantificar el impacto ambiental es a través de los contaminantes que se generan en los procesos de combustión. Los principales son monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y partículas. El monóxido de carbono y los hidrocarburos son productos de combustión incompleta. El dióxido de carbono, al igual que el vapor de agua, aunque no son considerados contaminantes, sí son importantes gases de efecto invernadero y por lo tanto es deseable su reducción. El dióxido de azufre se emite debido a los compuestos de azufre contenidos en los combustibles y es uno de los precursores de lluvia ácida. El hollín se forma especialmente en las combustiones incompletas de combustibles diesel, su toxicidad se debe a partículas de carbón que adsorben compuestos potencialmente cancerígenos, como los hidrocarburos aromáticos polinucleares. Los óxidos de nitrógeno pueden formarse debido a la reacción entre el oxígeno y el nitrógeno del aire a temperaturas por encima de 1000°C. Los óxidos de nitrógeno son precursores de lluvia ácida. Otra fuente de óxidos de nitrógeno es el nitrógeno contenido en los combustibles. La formación de partículas es consecuencia de un alto contenido de cenizas en el combustible o de una mala atomización del mismo. Otra forma de estimar el impacto es a partir de la cantidad de oxígeno requerido para la combustión.

### **10.1 Impacto ambiental de las mezclas bioetanol – gasolina**

#### **10.1.1 Estimación del impacto ambiental por masa de combustible**

Usando los datos calculados de productos de combustión y oxígeno requerido, se calculó el impacto ambiental del uso de mezclas bioetanol – gasolina. La Figura 2310.1 muestra el impacto ambiental por kg de mezcla basado en las emisiones de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub> y en los requerimientos de O<sub>2</sub>. Es notable la disminución del impacto con el aumento de bioetanol en la mezcla, debido principalmente a la disminución del CO<sub>2</sub> y al requerimiento de O<sub>2</sub>.

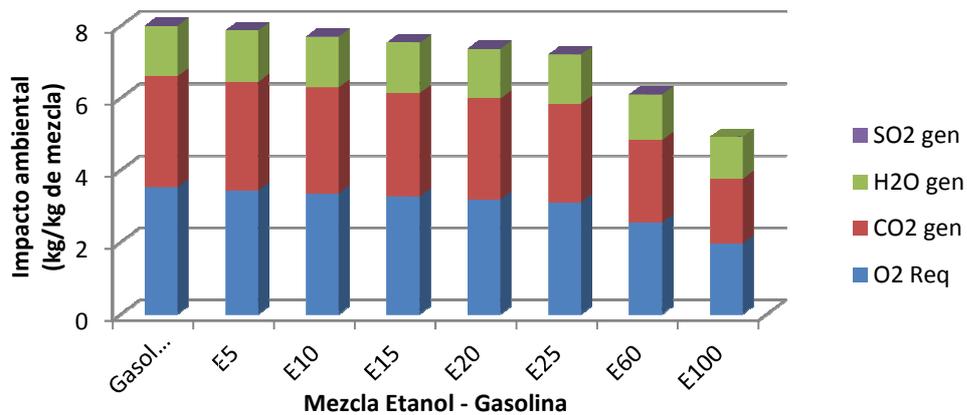


Figura 23. Impacto ambiental por kg de combustible

### 10.1.2 Estimación del impacto ambiental por energía producida.

Aunque el impacto ambiental de las mezclas disminuye debido al oxígeno extra proveniente del bioetanol, se sabe que el etanol tienen menor poder calorífico que la gasolina, por lo tanto para una misma demanda de energía, al aumentar la proporción de etanol en la mezcla, se incrementa la cantidad usada de combustible, el oxígeno requerido y las emisiones producidas. Usando los datos estimados del poder calorífico superior de la Figura 10 se calcularon el impacto ambiental representado en las emisiones de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub> y en los requerimientos de O<sub>2</sub> por GJ de energía producida. Los resultados se muestran en la Figura 10.2.

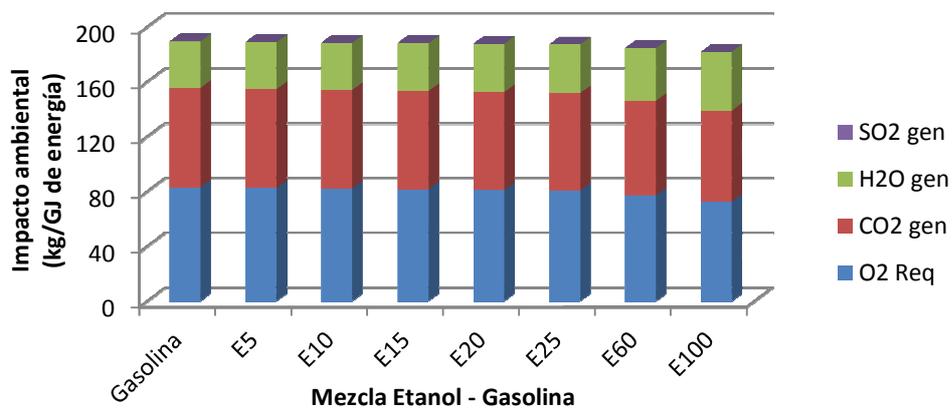


Figura 10.2. Impacto ambiental por GJ de energía.

Cuando se hace la corrección por energía producida, se observa que el impacto ambiental generado por la gasolina sin mezclar es casi igual que el de las mezclas etanol – gasolina. Este es el mismo resultado encontrado por Török (59) en su estudio del impacto ambiental de los biocombustibles en el transporte.

### 10.1.3 Corrección del CO<sub>2</sub> de biomasa

Si se considera que el ciclo del carbono en la combustión de la biomasa es perfecto, el CO<sub>2</sub> generado en la combustión del bioetanol y emitido a la atmósfera sería el mismo CO<sub>2</sub> absorbido por las plantas que le dieron origen, en el caso de Colombia, la caña de azúcar. De acuerdo a lo anterior, debería descontarse el CO<sub>2</sub> proveniente del bioetanol en la estimación del impacto ambiental. La Figura 10. muestra lo anterior, notándose que de ésta manera la disminución del impacto ambiental a medida que se incrementa el contenido de bioetanol en la mezcla es significativamente importante.

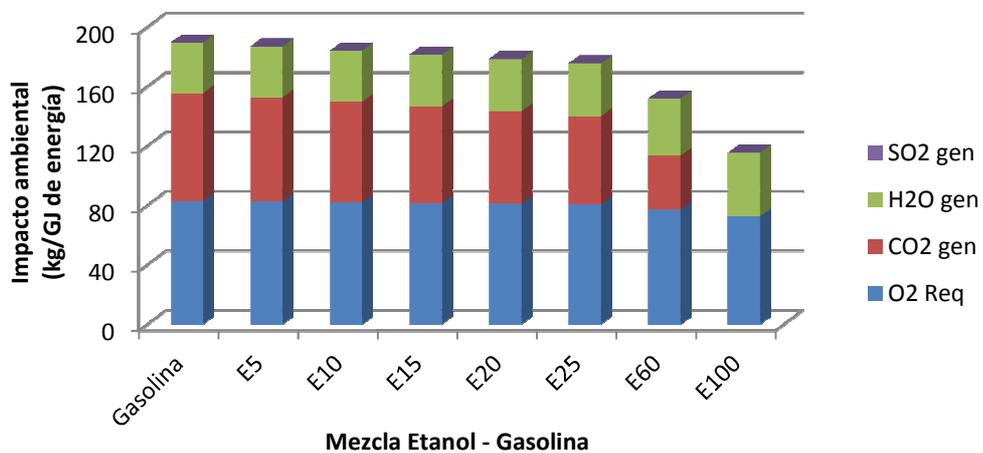
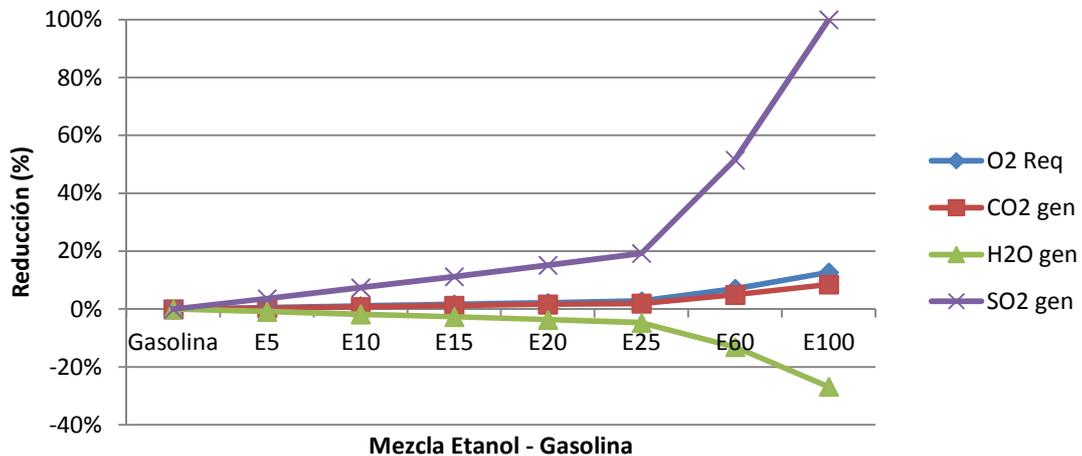


Figura 10.3. Impacto ambiental por energía con corrección de CO<sub>2</sub>

Graficando en términos de los porcentajes de reducción de emisiones con respecto a la gasolina, se construyó la Figura 10.4. Se observa una fuerte reducción en el CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> debido al nulo aporte

del bioetanol en la emisión de éstos gases. La reducción en requerimiento de oxígeno alcanza sólo el 13% para el B100. El vapor de agua se incrementa en un 27%.



**Figura 10.4. Porcentaje de reducción de emisiones**

#### 10.1.4 Otras emisiones de las mezclas bioetanol – gasolina

Las principales ventajas ambientales vinculadas al bioetanol son la reducción en emisiones de CO, hidrocarburos y compuestos aromáticos. En el sector de transporte, mientras más antiguo sea el motor (con carburador, sin catalizador), más significativo es el potencial de ventajas ambientales, cuando se mezcla el etanol y la gasolina.

De acuerdo a Mantilla (104), la formación de CO está directamente ligada a la eficiencia de la combustión, es decir, a que la mayor o menor cantidad de carbono procedente del combustible se quemé completamente o no. El efecto del etanol en la mezcla mejora la combustión debido a la presencia de oxígeno que aumenta la velocidad de la llama.

En Brasil, se estima que la adición de bioetanol a la gasolina generó reducciones del orden del 50% en la emisión de CO y la eliminación del plomo como aditivo (105).

Al Hasan (106) midió las emisiones de exhosto para diferentes mezclas de bioetanol – gasolina y encontró las mayores reducciones con la mezcla E20. En promedio fueron del 46% en CO y 24% para HC, sin embargo, para el CO<sub>2</sub> se encontró un incremento del 7,5%.

El Health Effects Institute (107) realizó estudios sobre el uso de E10 en vehículos y encontró un descenso medio las emisiones de hidrocarburos de un 5%, una disminución de las emisiones de CO de 13% y un aumento de las emisiones de NOx del 5%. Estos mismos estudios mostraron una disminución en las emisiones de tóxicos al aire, del 12% para el benceno y del 6% para el 1,3-butadieno, del 12% y el 6%, mientras que las emisiones de acetaldehído aumentaron en un 159%. Las emisiones por evaporación de hidrocarburos también aumentaron con la mezcla de etanol a la gasolina.

Najafi et al. (108) por medio de la metodología de redes neuronales estimaron el efecto del contenido de bioetanol en las emisiones de las mezclas bioetanol – gasolina, y al igual que los resultados anteriormente descritos encontraron que las emisiones de CO<sub>2</sub> y NOx aumentaron mientras que las de CO y HC disminuyeron con respecto al uso de la gasolina.

Schifter et al. (75) evaluaron el comportamiento y las emisiones de mezclas bioetanol –gasolina en un motor de un solo cilindro y encontraron reducción significativa en las emisiones de CO y HC y aumento en las de NOx.

Entre los impactos negativos se encuentra el aumento en las emisiones de aldehídos y óxidos de nitrógeno (109). El problema de los aldehídos como formaldehído y acetaldehído es que son fotoquímicamente muy reactivos y pueden ocasionar la formación de contaminantes atmosféricos secundarios como ozono, peróxido de hidrógeno, ácido fórmico, monóxido de carbono, ácido acético, ácido peracético y nitrato de peroxiacetilo (PAN) incrementándose de esta manera el ozono atmosférico de alta toxicidad (110).

Tanner et al. realizaron estudios sobre el uso de mezclas E20 y E30 en vehículos y encontraron aumento de los niveles atmosféricos de acetaldehído y formaldehído (111).

En Albuquerque, Nuevo México, Gaffney et al. (112) encontraron niveles elevados de aldehído atmosférico con el uso de la mezcla E10.

Un estudio realizado en Canadá acerca del impacto del uso de la mezcla E10 estimó un incremento entre 0.4 y 1.6% en la emisión de ozono, un aumento entre el 1 y 5% de formaldehído y de 2.7% en acetaldehído, un incremento del 2,9 al 4,5 % en los niveles de PAN y reducción del 15% en CO (113).

## 10.2 Impacto ambiental de las mezclas biodiesel – diesel

### 10.2.1 Estimación del impacto ambiental por masa de combustible

Usando los datos de las sesiones 7.4 y 9.16.4 y, se calculó el impacto ambiental del uso de mezclas biodiesel - diesel. La Figura 24 muestra el impacto ambiental por kg de mezcla basado en las emisiones de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub> y en los requerimientos de O<sub>2</sub>. Es notable la disminución del impacto con el aumento de biodiesel en la mezcla, debido principalmente a la disminución del CO<sub>2</sub> y al requerimiento de O<sub>2</sub>.

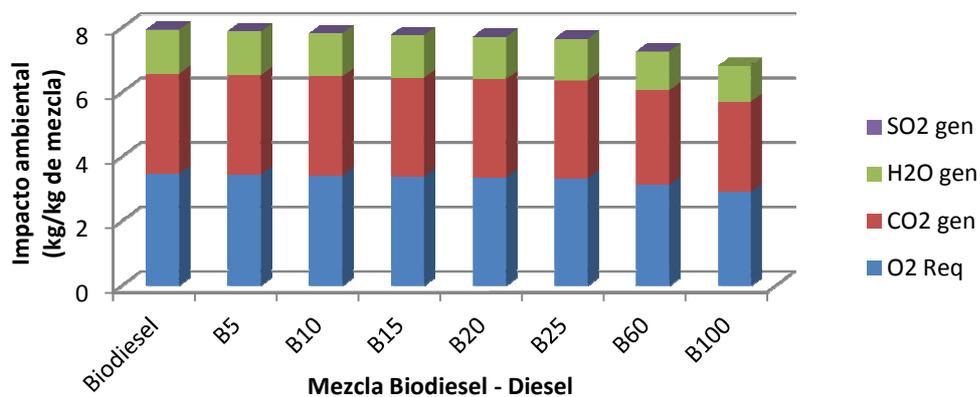


Figura 24. Impacto ambiental por kg de combustible

### 10.2.2 Estimación del impacto ambiental por energía producida.

Aunque el impacto ambiental de las mezclas disminuye debido al oxígeno extra proveniente del biodiesel, se sabe que el biodiesel tiene un poder calorífico ligeramente menor, por lo tanto para igual demanda de energía, se incrementa la cantidad usada de combustible, el oxígeno requerido y las emisiones producidas. Usando los datos estimados del poder calorífico superior de la Figura 13 se calculó el impacto ambiental representado en las emisiones de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub> y en los requerimientos de O<sub>2</sub> por GJ de energía producida. Los resultados se muestran en la Figura 10.6.

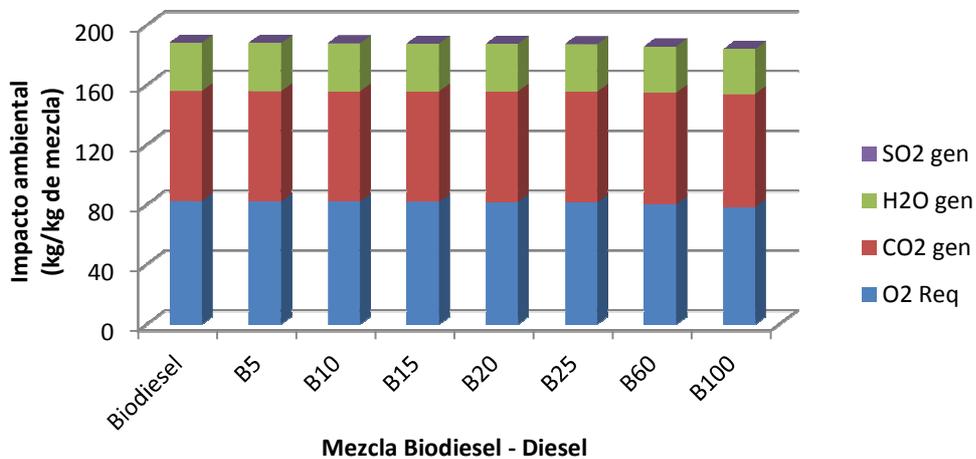


Figura 10.6. Impacto ambiental por GJ de energía.

Cuando se hace la corrección por energía producida, se observa que el impacto ambiental generado por la diesel sin mezclar es casi igual que el de las mezclas biodiesel - diesel. Este es el mismo resultado encontrado por Török (59) en su estudio del impacto ambiental de los biocombustibles en el transporte.

### 10.2.3 Corrección del CO<sub>2</sub> de biomasa

Si se considera que el ciclo del carbono en la combustión de la biomasa es perfecto, el CO<sub>2</sub> generado en la combustión del biodiesel y emitido a la atmósfera sería el mismo CO<sub>2</sub> absorbido por las plantas que le dieron origen, en el caso de Colombia, la palma de aceite. De acuerdo a lo

anterior, debería descontarse el CO<sub>2</sub> proveniente del biodiesel en la estimación del impacto ambiental. La Figura 25 muestra lo anterior, notándose que de ésta manera la disminución del impacto ambiental a medida que se incrementa el contenido de biodiesel en la mezcla es significativamente importante.

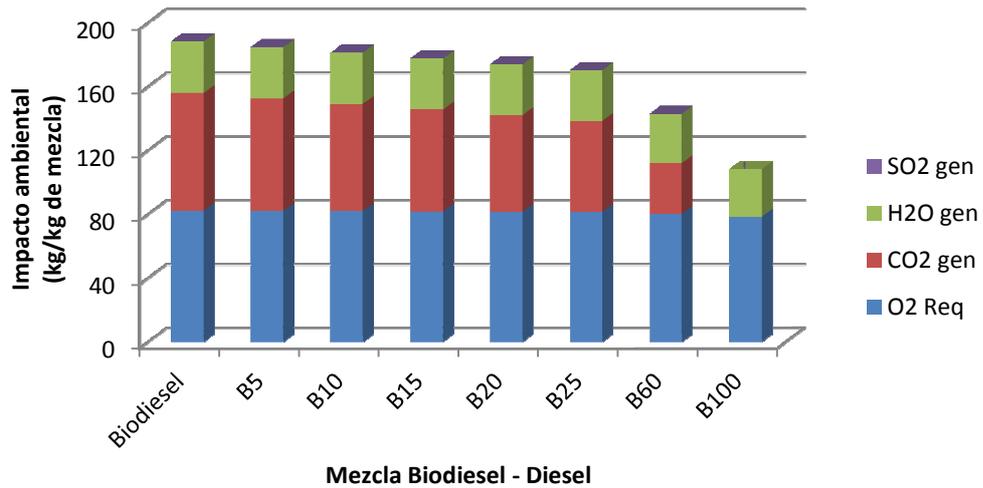


Figura 25. Impacto ambiental por GJ de energía con corrección de CO<sub>2</sub>

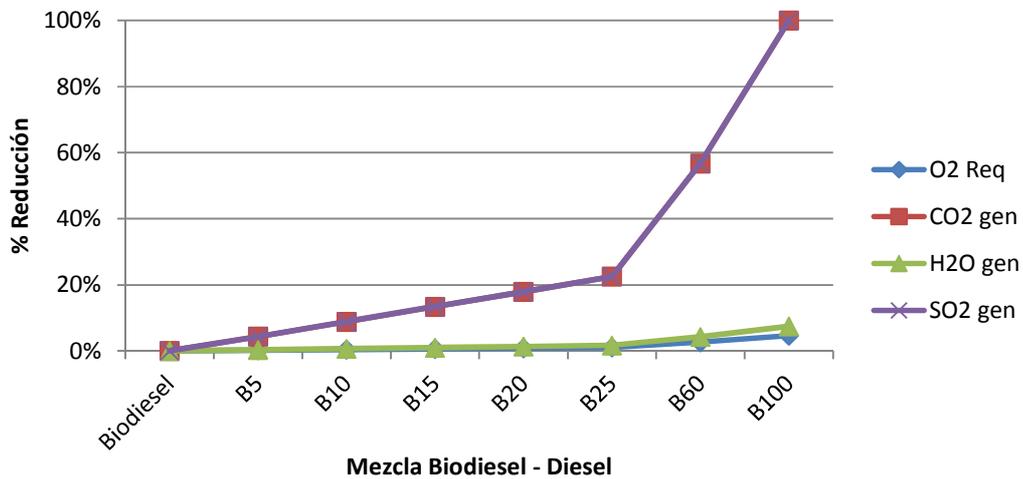


Figura 10.8. Porcentaje de reducción de emisiones

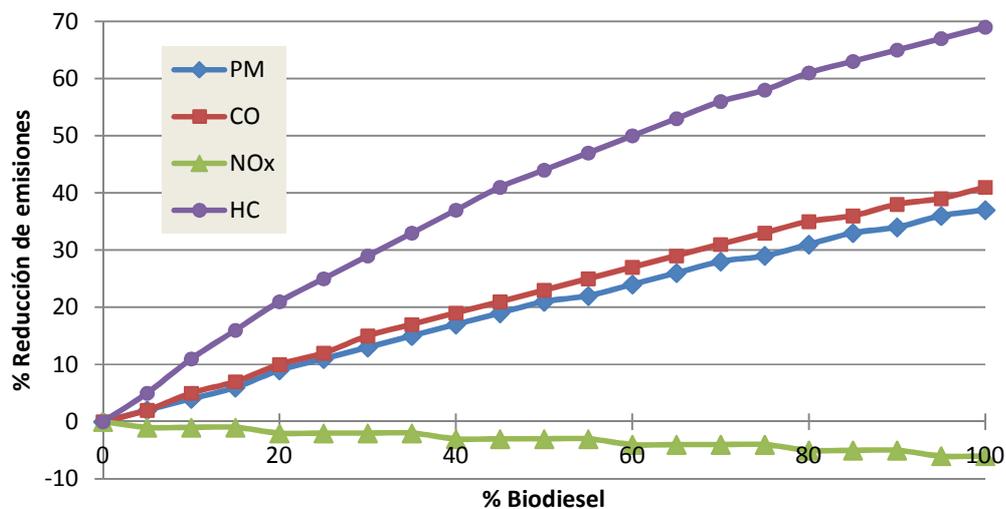
Graficando en términos de los porcentajes de reducción de emisiones con respecto al diesel, se construyó la Figura 10.8. Se observa una fuerte reducción en el CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> debido al nulo aporte del

biodiesel en la emisión de éstos gases. La reducción en requerimiento de oxígeno alcanza y generación de vapor de agua es baja, es decir, casi no hay diferencia con el diesel.

#### **10.2.4 Otras emisiones de las mezclas biodiesel - diesel**

Como se ha visto anteriormente, el biodiesel y el diesel tienen propiedades físicas y químicas similares. De acuerdo a la EPA (114), con excepción de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), la adición de biodiesel al diesel favorece la disminución de contaminantes con respecto al diesel. Las emisiones varían dependiendo del motor, condiciones del vehículo y calidad del combustible, las potenciales reducciones de contaminantes son considerables y se incrementan casi linealmente al aumentar la proporción de biodiesel en la mezcla. En comparación con el combustible diesel de origen fósil, el biodiesel elimina las emisiones de SO<sub>2</sub>, reduce las emisiones de CO y COVs, especialmente benceno, y el material particulado (MP). Sin embargo, se produce un aumento en las emisiones de NOx, entre los que se incluye el óxido nitroso, el cual es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 300 veces mayor que el dióxido de carbono.

La EPA construyó un modelo para evaluar la reducción de las emisiones de MP, CO, HC y NOx. Este modelo se basa en el tipo de biodiesel y en unas constantes parametrizadas de acuerdo al año en el cual se evalúa la emisión y basándose en numerosos estudios realizados en todo el mundo y reportados en revistas científicas. El modelo está desarrollado en Excel y se encuentra disponible en la página web de la EPA. Su ejecución con mezclas de biodiesel de palma y diesel de petróleo se muestra en la Figura 10.9. Se observa una reducción significativa en los HC, CO y MP, y aumento de los NOx.



**Figura 10.9. Porcentaje de reducción de emisiones de acuerdo al modelo de la EPA**

De acuerdo a la EPA la producción de ozono es 50% menor en el biodiesel que en el diesel, las emisiones de PM<sub>10</sub> (partículas con tamaño inferior a 10 μ) provenientes de motores con biodiesel son 47% por ciento menores que las emisiones de PM<sub>10</sub> generadas por diesel de petróleo. Las emisiones de escape de HC son 67% menores en el biodiesel que en el diesel. Las emisiones de biodiesel muestran niveles 75% menores de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PHAs), con excepción del benzoantraceno, que es reducido aproximadamente en un 50%. Los PHAs nitrados como el 2-nitrofluoreno y 1-nitropireno se han reducido un 90% en el biodiesel. Las emisiones de NOx del biodiesel aumentan o disminuyen de acuerdo al estado de mantenimiento del motor y a la metodología utilizada en la prueba. Las emisiones de NOx de biodiesel puro (100%) tienen un incremento del 2%. Sin embargo, la ausencia de azufre en el biodiesel permite el uso de tecnologías del control de NOx que no pueden ser utilizadas con el diesel convencional. Adicionalmente, algunas compañías han desarrollado aditivos que reducen las emisiones de NOx en las mezclas de biodiesel.

Estudios comparativos de las emisiones de combustión del biodiesel, diesel y sus mezclas se han realizado con diferentes tipos de biodiesel y motores. En la mayoría de los estudios se reportan disminuciones del 60% de emisiones de CO y aumentos del 80% de emisiones de NOx (110).

Debido al contenido de oxígeno presente en la estructura del biodiesel, aproximadamente del 13,3% según la Figura 7.3, el proceso de combustión es más eficiente, lo cual permite la disminución de los valores de monóxido de carbono, NOx y HC sin quemar (97).

Knothe (14) comparó las emisiones de óxidos de nitrógeno, NOx, HC de varios alcanos y metilésteres presentes en el biodiesel con el diesel. Encontró un aumento del 12,5% en las emisiones de NOx del metiléster del aceite de soya, 6,2% en el metil oleato, una reducción del 4,3% del metil palmitato y una reducción del 5% en el metil laurato. Se concluye que son los metilésteres insaturados y no los saturados los responsables del incremento de las emisiones de NOx. Con relación al NOx, se presentó reducción en todos los metilésteres: 77,6% en metiléster del aceite de soya, 72,9% en el metil oleato, 81,9% en el metil palmitato y 81,2% en el metil laurato. Los resultados para los HC mostraron la dependencia con la longitud de la cadena. Se encontró reducción del 44,4% en el metil soyato, 54,6% en el metil oleato, 29,2% en el metil palmitato y aumento del 13,2% en el metil laurato con respecto al diesel. Por otro lado, las emisiones de CO disminuyeron significativamente en todos los metil ésteres. Se redujeron en un 15% en el metiléster de soya, 25% en el metil oleato, 49% en el metil palmitato y 43,1% en el metil laurato.

Basha et al. (26) realizaron una revisión bibliográfica sobre el uso de biodiesel y encontraron que las emisiones de óxidos de nitrógeno aumentaron en todos los casos reportados en diferentes mezclas de varios tipos de biodiesel en relación con el diesel.

Kalam y Masjuki (115) estudiaron las emisiones de mezclas biodiesel – diesel B8 y B15 y encontraron reducción en las emisiones de CO, NOx, HC y metales como hierro, zinc, aluminio, plomo y cobre con respecto al diesel, mientras que las emisiones de calcio aumentaron.

Agudelo et al. (8) realizaron pruebas en un motor diesel con mezclas de biodiesel de palma y diesel en proporciones B5, B10 y B20. Reportaron que las emisiones de HC disminuyeron en la misma proporción que el contenido de biodiesel en la mezcla. Las emisiones de HC disminuyeron en la proporción correspondiente con la mitad del contenido de biodiesel en la mezcla (2.5, 5 y 10%, para B5, B10 y B20 respectivamente). Las emisiones específicas de NOx incrementaron ligeramente, y alcanzaron un máximo para la mezcla B20 del 3% respecto al diesel.

Lin et al. (99) evaluaron las emisiones de las mezclas B20 y B100 con respecto a las de diesel y encontraron que mientras para la mezcla B20 las emisiones de MP y HC disminuyeron, en el B100 aumentaron. La reducción en la emisión de HC fue alta para B20, cerca al 54% y apenas del 2% para la mezcla B100. Las emisiones de NOx se redujeron ligeramente en el B20 y aumentaron un 3% con el B100.

Kim et al. (116) reportan que el uso de mezclas biodiesel – diesel reduce las emisiones de CO y de HC con respecto al diesel, pero aumentan las de óxidos de nitrógeno debido al contenido de oxígeno en el combustible.

Lin et al. (117) probaron diesel, biodiesel y mezclas B20 y B50 en motores y encontraron que la mezcla B20 producía las menores emisiones de CO, la mezcla B50 produjo las mayores emisiones de CO<sub>2</sub>. El biodiesel y las mezclas emitieron mayores cantidades de NOx y la formación de SO<sub>2</sub> mostró una tendencia creciente cuando el porcentaje de diesel se incrementó en los combustibles. Las emisiones de partículas se aumentaron con el incremento de biodiesel en las mezclas.

Yage et al. (90) probaron mezclas de diesel con biodiesel producido con aceites residuales de cocina y encontraron que las emisiones de HC y CO disminuían proporcionalmente al contenido de biodiesel en la mezcla, mientras que las de NOx aumentaban.

Lin et al. (118) determinaron el efecto de la mezcla de diesel con biodiesel de palma en la reducción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PHAs), altamente tóxicos y cancerígenos, y encontraron que el incremento de biodiesel en el combustible reducía considerablemente la emisión de estos hidrocarburos.

Ng et al. (119) evaluaron las emisiones de diferentes mezclas de biodiesel de palma y diesel. Reportaron que las emisiones de CO disminuyen en la misma medida que las de NOx aumentan, y que por esto es necesario establecer la cantidad de biodiesel que permita compensar la disminución en el CO con el aumento en los NOx.

### **10.3 Otros impactos asociados al uso de biocombustibles**

El impacto ambiental de los biocombustibles no puede medirse sólo en función de sus emisiones, sino que deben observarse otros factores relacionados con su producción y consumo. La producción agrícola provoca generalmente efectos negativos en el suelo, el aire, el agua y la biodiversidad. La magnitud de estos efectos depende del tipo de materia prima, las tecnologías, la escala de producción, del modo en que influyen en el cambio en el uso de la tierra la intensificación y el comercio internacional.

Los biocombustibles pueden disminuir las emisiones de gases efecto invernadero durante su combustión, pero es importante conocer cuánto se emite debido al cultivo y transformación de las materias primas.

Algunos cultivos generan aún más gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles, el óxido nitroso, por ejemplo, es liberado por fertilizantes nitrogenados. La producción de fertilizantes, plaguicidas y combustibles empleados en la agricultura y la elaboración de productos químicos el transporte, la distribución y hasta el uso final genera también la emisión de gases de efecto invernadero (12).

La intensificación de los sistemas de producción agrícola de materias primas como la caña de azúcar y la palma de aceite, y la conversión de tierras de cultivo ya existentes y nuevas pueden tener repercusiones ambientales mayores que sus efectos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos efectos están asociados a la producción agrícola, escasez y contaminación del agua, degradación del suelo, agotamiento de los nutrientes y pérdida de la biodiversidad silvestre y agrícola (120).

Por otro lado, los cultivos energéticos, como se les llama a las materias primas vegetales para producir biocombustibles, no son tan eficaces como el bosque y la selva para capturar CO<sub>2</sub>. Por tal motivo la transformación de selvas y bosques en cultivos de palma de aceite o caña de azúcar estarían de manera indirecta incrementando el efecto invernadero.

Otro impacto que debe tenerse en cuenta es el uso y contaminación de los recursos hídricos. La caña de azúcar y la palma de aceite requieren cantidades elevadas de agua, lo que se constituye en un impacto ambiental negativo. De igual forma, la transformación de estas materias primas en bioetanol y biodiesel puede requerir grandes cantidades de agua, principalmente para lavar las plantas y semillas, lavado del biodiesel, torres de enfriamiento, intercambiadores de calor y demás aguas de proceso (121).

La contaminación de los recursos hídricos está asociada con la aplicación de fertilizantes, plaguicidas y productos agroquímicos, la erosión del suelo, el lavado de la caña de azúcar y de la

palma. La producción de biodiesel y etanol genera aguas residuales con alta carga orgánica que si no son tratadas adecuadamente pueden causar la eutrofización de las aguas superficiales. En las etapas de distribución y almacenamiento, la posibilidad de efectos negativos ocasionados por derrames es mucho menor que con los combustibles fósiles debido a que el biodiesel y el etanol son biodegradables.

Por otro lado, el cambio del uso de la tierra y la intensificación de cultivos pueden ocasionar efectos adversos en el suelo, que dependen de las técnicas agrícolas empleadas. Prácticas inadecuadas pueden reducir la materia orgánica del suelo e incrementar la erosión eliminando la cubierta permanente del suelo. La eliminación de residuos vegetales puede reducir el contenido en nutrientes del suelo y aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la pérdida de carbono del suelo. Sin embargo, el cultivo de plantas perennes como la palma de aceite y la caña de azúcar puede mejorar la calidad del suelo mediante el aumento de la cubierta vegetal y del contenido de carbono orgánico. La calidad del suelo puede mantenerse gracias al reciclado de nutrientes a partir de residuos de la destilación y la molienda de la caña de azúcar (37).

Por último, la pérdida de biodiversidad se inicia con la pérdida del hábitat como resultado de la conversión de tierras, como bosques o praderas, para la producción de cultivos. La conversión de ecosistemas naturales en plantaciones de palma de aceite ocasiona una pérdida de biodiversidad. A pesar de que los cultivos de palma de aceite no necesitan grandes cantidades de fertilizantes ni plaguicidas, ni siquiera en suelos pobres, su expansión podría provocar la desaparición de selvas lluviosas y bosques (12).

## 11 DISEÑO CONCEPTUAL DE UN LABORATORIO PARA LA CERTIFICACION DE LA CALIDAD DE BIOCOMBUSTIBLES

La calidad de los biocombustibles está reglamentada en Colombia por la NTC 5308 para la calidad del bioetanol y por la NTC 5444 para el biodiesel. A continuación se describen cada una de las normas.

### 11.1 Norma técnica colombiana NTC 5308 para el etanol

La calidad del bioetanol en Colombia es regida por la Resolución 447 de 2003 y la determinación de sus parámetros de acuerdo a la norma técnica colombiana NTC 5308, como se muestra en la Tabla 11.1.

**Tabla 11.1. Parámetros de calidad del etanol NTC 5308**

Parámetro	Norma
Aspecto	Visual
Color	Visual
Acidez total	ASTM D 1613
Conductividad eléctrica	ASTM D 1125
Densidad a 20°C	ASTM D 4052
Grado de etanol	ASTM D 5501
Grado de metanol	ASTM D 5501
Cloruros, sulfatos y otros iones	ASTM D 512 o ASTM D 4806
Contenido de Agua	ASTM E 1064 o ASTM E 203

La descripción de los parámetros de la Norma NTC 5308 se muestra en el Anexo 1.

### 11.2 Norma técnica colombiana NTC 5444 para el biodiesel

La calidad del biodiesel en Colombia es regulada por la norma técnica colombiana NTC 5444, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 11.2.

**Tabla 11.2. Parámetros de calidad del biodiesel NTC 5444**

<b>Parámetro</b>	<b>Norma</b>
Viscosidad Cinemática	Norma ASTM D 445
Punto de Inflamación	Norma ASTM D93
Número de cetanos	Norma ASTM D 613
Corrosión lámina de cobre	Norma ASTM D 130
Densidad a 15°C	Norma ASTM D 4052
Estabilidad Térmica	Norma ASTM D 6468
Contenido de fósforo	Norma ASTM D 4951
Destilación (PFE )	Norma ASTM D 86
Número ácido	Norma ASTM D 664
Temperatura de Obturación del filtro frío (CFPP)	Norma ASTM D6371
Punto de nube/ enturbiamiento	Norma ASTM D 2500
Punto de fluidez	Norma ASTM D 97
Carbón residual	Norma ASTM D 4530
Contenido de sodio y potasio	Norma ASTM D 5863
Contenido de calcio y magnesio	Norma ASTM D 5863
Contenido de Monoglicéridos	Norma ASTM D 6584
Contenido de Diglicéridos	Norma ASTM D 6584
Contenido de Triglicéridos	Norma ASTM D 6584
Glicerina libre y total	Norma ASTM D 6584
Contenido de metanol o etanol	Norma ISO 14110
Contenido de éster	Norma EN 14103
Contenido de alquilester de ácido linoleico	Norma EN 14103
Índice de yodo	Norma EN 14111
Azufre	Norma ASTM D4294, ASMT D 2622 ASTM D 1552 o D 1266
Contenidos de Aromáticos	Norma ASTM D5186 ó ASTM D1319
Agua y Sedimento	Norma ASTM D1796 ó ASTM D 2709
Lubricidad	Norma ASTM D6079
Contaminación Total	Norma EN 12662
Contenido de Agua	Norma ASTM E 203
Estabilidad a la oxidación	Norma ASTM D4625
Cenizas sulfatadas	Norma ASTM D 874

La descripción de los parámetros de la Norma NTC 5444 se muestra en el Anexo 2.

Los equipos y materiales y la guía de prácticas en el laboratorio se encuentran en el Anexo 3.

### **11.3 Laboratorio de desempeño en motores**

Este laboratorio evaluará el desempeño de la combustión de los biocombustibles y sus mezclas en motores. Contará con un motor diesel y un motor de gasolina con sistema de inyección con el fin de medir la facilidad de arranque, desarrollo de potencia, nivel de ruido, economía de combustible, desgaste (lubricidad), operabilidad a baja temperatura, duración del filtro y emisiones de escape. La descripción del laboratorio de combustión se muestra en el Anexo 4.

### **11.4 Laboratorio de desempeño una cámara de combustión**

El desempeño de los combustibles en quemadores se evaluará en una unidad de combustión que permite examinar diversos aspectos de la combustión y de la operación como encendido, estabilidad de la llama, forma de la llama, radiación de la llama, emisión de gases, eficiencia de la combustión, transferencia térmica y balance energético. La descripción del laboratorio de combustión se muestra en el Anexo 5.

## 12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existen pocos estudios acerca de la predicción de las propiedades de las mezclas de biocombustibles como el biodiesel y el bioetanol con combustibles fósiles convencionales como el diesel del petróleo y la gasolina. En este trabajo se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica con el fin de encontrar expresiones para estimar las propiedades de los biocombustibles y para hallar resultados experimentales de las mismas.

Se evaluaron diferentes expresiones disponibles en la literatura científica y se compararon con datos experimentales reportados y se encontró que la mayoría de las propiedades de las mezclas de biocombustibles no cumplen con las leyes de mezcla ideal. Se encontró poca desviación para algunas propiedades como la densidad, y una alta desviación para otras como el punto de nube.

Las expresiones con menor desviación con respecto a los datos reales para las mezclas etanol – gasolina fueron:

**Tabla 12.1. Ecuaciones usadas para las mezclas etanol - gasolina**

Propiedad	Ecuación	
Densidad	Modelo de mezcla ideal	$\rho_m = \sum \rho_i x_i$
Viscosidad dinámica	Modelo de Bingham	$\frac{1}{\mu_m} = \sum \frac{x_i}{\mu_i}$
Poder calorífico superior	Modelo de Jenkins	$PCS=0,4791C+0,6676H+0,0589O-1,2077S-8,42$
Capacidad calorífica	Modelo de mezcla ideal	$C_{p,m} = \sum x_i C_{p,i}$
Temperatura de inflamación	Correlación de Catoire	$FP(K) = 0,3544 T_b^{1,14711} z^{-0,07677}$

Mientras que para las mezclas biodiesel – diesel:

**Tabla 12.2. Ecuaciones usadas para las mezclas biodiesel - diesel**

Propiedad	Ecuación	
Densidad	Modelo de mezcla ideal	$\rho_m = \sum \rho_i x_i$
Viscosidad dinámica	Modelo de Grunberg Nissan	$\ln \mu_m = \sum_i^n y_i \ln \mu_i$
Poder calorífico superior	Modelo de Jenkins	$PCS=0,4791C+0,6676H+0,0589O-1,2077S-8,42$
Capacidad calorífica	Modelo de mezcla ideal	$C_{p,m} = \sum x_i C_{p,i}$
Punto de nube	Correlación de Cheenkachorn	$CN=33.6+0.539(C18:0)+0.303(C18:1)+0.0878(C18:2)+0,233(C22:1)$
Número de cetano	Correlación de Imahara	$P.N.(K) = 299.6 y_{C16:0} + 378.5y_{C18:0} + 266.5y_{C18:1} + 265.2y_{C18:2}$
Temperatura de inflamación	Correlación de Catoire	$FP(K) = 0,3544 T_b^{1,14711} z^{-0,07677}$

La producción de gases en la combustión de las mezclas en diferentes proporciones también fue modelada. Las propiedades físicas y térmicas de los productos de combustión fueron determinadas, lo cual es un aporte importante para los estudios e investigaciones en torno al aprovechamiento energético de los mismos, teniendo en cuenta que estas propiedades no han sido modeladas ni determinadas experimentalmente, lo cual permite su uso en sistemas de intercambio de calor.

En el análisis de las emisiones generadas en la combustión de las mezclas de biocombustibles se encontró que la principal reducción se da debido a que las emisiones de dióxido de carbono provenientes de los biocombustibles se pueden descontar debido a que se estima que es la misma que se usó en la fotosíntesis de las plantas que les dieron origen. Adicionalmente, se encontró en

la literatura que el uso de bioetanol genera emisiones bajas de aldehídos y el uso de biodiesel aumenta las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Finalmente se identificaron los principales elementos que se deben tener en cuenta para el montaje de un laboratorio que certifique los requerimientos de calidad de los biocombustibles de acuerdo con las normas internacionales.

La metodología descrita para el cálculo de las propiedades puede ser usada para otras mezclas como diesel con otros tipos de biodiesel, biodiesel y bioetanol, gasolina y butanol, etc. Se recomienda continuar investigando en la predicción de otras propiedades como entalpía de combustión, entropía específica y exergía química de las mezclas.

Se recomienda continuar investigando en la predicción de propiedades de mezclas de biodiesel producidos a partir de otras materias primas, variación de las propiedades con la temperatura y otros parámetros que no fueron incluidos en este estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Agencia Internacional de Energía, EIA, Key World Energy Statistics, 2010.
2. Organización Latinoamericana de Energía, Olade, Informe de Estadísticas Energéticas, 2009.
3. Ormerod, W., Freund, P., Smith, A., Davison, J. Ocean storage of CO<sub>2</sub>, IEA, Greenhouse gas R&D programme, International Energy Agency, 2002.
4. Bozbas, K., Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the European Union, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, Vol. 12, págs. 542–552.
5. Higuera, O., Trisancho, J., Florez, L., Biocombustibles y su aplicación en Colombia, 2007, Scientia et Technica , Vol. 34.
6. Ulmanen, J., Verbong, G., Raven, J., 2009, Biofuel developments in Sweden and the Netherlands Protection and socio-technical change in a long-term perspective, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, págs. 1406–1417.
7. Torres, J., Molina, D., Pinto, C., Rueda, F., Estudio de la mezcla de gasolina con 10% de etanol anhidro. Evaluación de propiedades fisicoquímicas, Ciencia, Tecnología y Futuro, 2002, Vol. 2.
8. Agudelo, J., Bedoya, I., Agudelo, A, Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma, 2005, Ingeniería y Desarrollo, Vol. 18.
9. Fischer, G., Prieler, S., Van Velthuisen, H., Lensink, S., Londo, M., De Wit, M, Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part I: Land productivity potentials, February de 2010, Biomass and Bioenergy, Vol. 34, págs. 159-172.
10. Walls, W., Rusco, F., Kendix, M, Biofuels policy and the US market for motor fuels: Empirical analysis of ethanol splashing, 2011, Energy Policy.
11. Agarwal, A. , Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustión engines (review), 2006, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 10, pág. 1016.
12. FAO, El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades, Roma, 2008.
13. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas, San José, 2007.
14. Knothe, G., Biodiesel and renewable diesel: A comparison, 2010, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 36, págs. 364–373.
15. Demirbas, A., Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels, 2008, Fuel, Vol. 87, págs. 1743–1748.
16. Karmakar, A., Karmakar, S., Mukherjee, S., Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production, 19, 2010, Bioresource Technology, Vol. 101, págs. 7201-7210.

17. Jitputti, J., Kitiyanan, B., Rangsunvigit, P., Bunyakiat, K., Attanatho, L., Jenvanitpanjakul, P., Transesterification of crude palm kernel oil and crude coconut oil by different solid catalysts, 1, 2006, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 116, págs. 61-66.
18. Tomei, J., Upham P. , Argentinean soy-based biodiesel: An introduction to production and impacts, 10, 2009, *Energy Policy*, Vol. 37, págs. 3890-3898.
19. García Núñez, Torres Novoa, Cabuya Parra, Cuellar Sánchez. Resultados de las Pruebas de Larga Duración con Biodiésel de Palma en una Flota de Servicio Público, Cenipalma, Ecopetrol, SI99, Fedepalma, Santafé de Bogotá, 2009.
20. Math, M., Kumar, S., Chetty, S. , Technologies for biodiesel production from used cooking oil — A review, 2010, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 14, págs. 339–345.
21. Mata, T., Martins, A., Caetano, N., Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, 1, 2010, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, págs. 217-232.
22. Avellaneda, F., Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal, Universidad de Rovira, 2010, Tesis doctoral en Ingeniería Química.
23. Hideki F, Akihiko K, Hideo N., Biodiesel fuel production by transesterification of oils: review, 2001, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol. 92, págs. 405–416.
24. Atadashi, I., Aroua, M., Aziz, A., High quality biodiesel and its diesel engine application: A review, 7, 2010, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, págs. 1999-2008.
25. Szybist, J., Song, J., Alam, M., Boehman, L. , Biodiesel combustion, emissions and emission control, 2007, *Fuel Processing Technology*, Vol. 88 , págs. 679–691.
26. Basha, S. A., Gopal, R., Jebaraj, S., A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance, 2009, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, págs. 1628–1634.
27. Orellana Zelaya, J., Evaluación de calidad de biodiesel elaborado con palma africana (*Elaeis guineensis*) y etanol, Tegucigalpa, 2007. Tesis de grado de Ingeniería Agroindustrial.
28. Sharma, Y., B. Singh, S.N. Upadhyay., Advancements in development and characterization, 2008, *Fuel* , Vol. 87, págs. 2355–2373.
29. Leung, D., Wu, X., Leung, M.,, A review on biodiesel production using catalyzed transesterification, 4, April de 2010, *Applied Energy*, Vol. 87, págs. 1083-1095.
30. Peng, B., Shu, Q., Wang, J., Wang, G., Wang, D., Han, M. , Biodiesel production from waste oil feedstocks by solid acid catalysis, 6, November de 2008, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 86, págs. 441-447.
31. Lam, M., Lee, K., Mohamed, A. , Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review, 4, July-August de 2010, *Biotechnology Advances*, Vol. 28, págs. 500-518.

32. Tan, K., Lee, K., A review on supercritical fluids (SCF) technology in sustainable biodiesel production: Potential and challenges, 5, June de 2011, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, págs. 2452-2456.
33. Lim, S., Hoong, S., Teong, L., Bhatia, S., Supercritical fluid reactive extraction of *Jatropha curcas* L. seeds with methanol: A novel biodiesel production method, 18, September de 2010, *Bioresource Technology*, Vol. 101, págs. 7169-7172.
34. Baroutian, S., Aroua, M., Aziz, A., Raman, A., Sulaiman, N., A packed bed membrane reactor for production of biodiesel using activated carbon supported catalyst, 2, 2011, *Bioresource Technology*, Vol. 102, págs. 1095-1102.
35. Gomez-Castro, F., Rico-Ramirez, V., Segovia-Hernandez, J., Hernandez, S., Feasibility study of a thermally coupled reactive distillation process for biodiesel production, 3, March de 2010, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 49, págs. 262-269.
36. Robra, S., Serpa da Cruz, R., Oliveira, A., Almeida Neto, J., Santos, J., Generation of biogas using crude glycerin from biodiesel production as a supplement to cattle slurry, 9, September de 2010, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 34, págs. 1330-1335.
37. Yee, K., Tan, K., Abdullah, A., Lee, K., Life cycle assessment of palm biodiesel: Revealing facts and benefits for sustainability, 2009, *Applied Energy*, Vol. 86, págs. 189–196.
38. Benjumea, P., Agudelo, J., Agudelo, A., Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends, 2008, *Fuel*, Vol. 87 (2008) , págs. 2069–2075.
39. Allen, K. C. Watts, R. G. Ackman, M. J. Pegg, Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition, 11, September de 1999, *Fuel*, Vol. 78, págs. 1319-1326.
40. Fassinou, W. F., Sako, A., Fofana, A., Blaise, K., Fatty acids composition as a means to estimate the high heating value (HHV) of vegetable oils and biodiesel fuels, 2010, *Energy* , Vol. 35, págs. 4949-4954.
41. Anand, K., Sharma, R., Mehta, P., A comprehensive approach for estimating thermo-physical properties of biodiesel fuels, 2011, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, págs. 235-242.
42. Imahara, H., Miinami, E., Saka, S., Thermodynamic study on cloud point of biodiesel with its fatty acid composition, 12-13, September de 2006, *Fuel*, Vol. 85, págs. 1666-1670.
43. Joshi, R., Pegg, M., Flow properties of biodiesel fuel blends at low temperatures, 2007, *Fuel*, Vol. 86, págs. 143–151.
44. Krisnangkura, K., Yimsuwan, T., Pairintra, T., An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at various temperatures, 2006, *Fuel* , Vol. 85, págs. 107–113.
45. Lapuerta, M., Rodríguez-Fernández, Font de Mora, E., Correlation fo rthe estimation of the cetane number of biodiesel fuels and implications on the iodine number, 2009, *Energy Policy*, Vol. 37, págs. 4337–4344.
46. Lapuerta, M., Rodríguez-Fernández, J., Armas, O., Correlation for the estimation of the density of fatty acid esters fuels and its implications. A proposed Biodiesel Cetane Index, 2010, *Chemistry and Physics of Lipids* , Vol. 163, págs. 720–727.

47. García, M., Gonzalo, A., Sánchez, J., Arauzo, J., Peña, J., Prediction of normalized biodiesel properties by simulation of multiple feedstock blends, 2010, *Bioresource Technology* , Vol. 101, págs. 4431–4439.
48. Ramos, M.J., Fernández, C.M., Casas, A., Rodríguez, L., Pérez, A., Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties, 2009, *Bioresource Technology* , Vol. 100, págs. 261–268.
49. Perdomo, F., Gil-Villegas, A., Predicting thermophysical properties of biodiesel fuel blends using the SAFT-VR approach, 2011, *Fluid PhaseEquilibria*.
50. Tesfa, B., Mishra R., Gu M., Powles, N., Prediction models for density and viscosity of biodiesel and their effects on fuel supply system in CI engines, 2010, *Renewable Energy*, Vol. 35, págs. 2752-2760.
51. Ramírez-Verduzco, L. F., García-Flores, B., Rodríguez-Rodríguez, J., Jaramillo-Jacob, A., Prediction of the density and viscosity in biodiesel blends at various temperatures, 2011, *Fuel* , Vol. 90, págs. 1751–1761.
52. Cheenkachorn, K., Predicting Properties of Biodiesels Using Statistical Models and Artificial Neural Networks, 2, 2006, *As. J. Energy Env*, Vol. 7, págs. 299-306.
53. Baroutian, S., Aroua, M., Aziz, A., Raman, A., Sulaiman, N., Prediction of palm oil-based methyl ester biodiesel density using artificial neural networks. 10, Kuala Lumpur, 2008, *Journal of Applied Science*, Vol. 8, págs. 1938-1943.
54. Clements, D. Nashville, Blending rules for formulating biodiesel fuel. Liquid fuels and industrial products for renewable resources, 1996, *Proceedings of the third liquid fuels conference American Society of Agricultural Engineers*. págs. 46-53.
55. Montoya, M., Evaluación integral de la eficiencia económica y ambiental de procesos para la obtención de biodiesel, Caldas, Universidad Nacional de Colombia. Manizales, 2008, Tesis de Maestría.
56. Sales-Cruz, M., Aca-Aca, G., Sánchez-Daza, O., López-Arenas, T., Pierucci and G., Buzzi Ferraris, Predicting critical properties, density and viscosity of fatty acids, triacylglycerols and methyl esters by group contribution methods, 2010, 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20.
57. Ferrando, N., Defiolle, D., Lacheta, V., Boutin, A., Ethanoled gasoline bubble pressure determination: Experimental and MonteCarlo modeling, 2010, *Fluid Phase Equilibria* , Vol. 299, págs. 132–140.
58. Pumphrey, J.A., Brand, J.I., Scheller, W.A., Vapour pressure measurements and predictions for alcohol–gasoline blends, 2000, *Fuel* , Vol. 79, págs. 1405–1411.
59. Török, A., Theoretical estimation of the environmental impact of biofuel mixtures, 1, 2009, *Transport*, Vol. 24, págs. 26–29.
60. Scenna, Nicolás, Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos, ISBN: 950-42-0022-2, 1999.

61. Arrhenius, S., Uber die Dissociation der in Wasser gelosten Stoffe, 1887, Z Phys Chem, Vol. 1, págs. 631–648.
62. Bingham, E. , The viscosity of binary mixtures, 1914, J Phys Chem , Vol. 18, págs. 157–165.
63. Kendall J, Monroe K., The viscosity of liquids II. The viscosity-composition curve for ideal liquid mixtures, 1917, Am Chem J, Vol. 9, págs. 1787–1802.
64. Reid R., Prausnitz J., Sherwood T., The properties of gases and liquids, New York : McGraw Hill, 1977.
65. Centeno, G., Sánchez-Reyna, G., Ancheyta, J., Muñoz, J., Cardona, N. , Testing various mixing rules for calculation of viscosity of petroleum blends, 2011, Fuel.
66. Allen, C., Watts, K. y Ackman, R., Pegg, M, Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition, 11, September de 1999, Fuel, Vol. 78, págs. 1319-1326.
67. Burgos Manjarrez, C. J., Aplicación del método de Mc Allister para sistemas binarios de 1-alcoholes, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia - México, 2010. Tesis de Grado en Ingeniería Química.
68. Channiwala, S., Parikh, P., A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels, 8, May de 2002, Fuel, Vol. 81, págs. 1051-1063.
69. Green, D., Perry, J., Perry's Chemical Engineers' Handbook. Eighth Edition, Mc Graw Hill, 2007.
70. Sarin, A., Arora, R., Singh, N., Sarin, R., Malhotra, R., Kundu, K., Effect of blends of Palm-Jatropha-Pongamia biodiesels on cloud point and pour point, 2009, Energy , Vol. 34, págs. 2016–2021.
71. Valencia, B.H., Termodinámica, [En línea] [Citado el: 25 de Mayo de 2011.] [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4090002/html/pages/cap4/c4\\_3.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4090002/html/pages/cap4/c4_3.htm).
72. Mc Cabe, Smith, Harriot, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, Mac Graw Hill, 1991.
73. Catoire, L., Paulmier, S., Naudet, V., Estimation of closed cup flash points of combustible solvent blends, 2006, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 35, págs. 9-14.
74. Serdar, Yucesu, Adnan Sozen, Tolga Topgul, Erol Arcakliog, Comparative study of mathematical and experimental analysis of spark ignition engine performance used ethanol–gasoline blend fuel, 2007, Applied Thermal Engineering , Vol. 27, págs. 358–368.
75. Schifter, I, Diaz, L., Rodriguez, R., Gómez, J.P., Gonzalez, U., Combustion and emissions behavior for ethanol–gasoline blends in a single cylinder engine, 2010, Fuel .
76. Eyidogan, M., Ozsezen, A., Canakci, M., Turkcan, A., Impact of alcohol–gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an SI engine, 2010, Fuel, Vol. 89, págs. 2713–2720.
77. Neroorkar, K., Schmidt, N., Modeling of vapor-liquid equilibrium of gasoline-ethanol blended fuels for flash boiling simulations, 2011, Fuel, Vol. 90, págs. 665–673.

78. Takeshita E, Rezende R, Guelli U de Souza S, Ulson de Souza A., Influence of solvent addition on the physicochemical properties of Brazilian gasoline, 10-11, 2008, Fuel, Vol. 87, págs. 2168–2177.
79. Marulanda, C., El mejoramiento de la calidad de los combustibles de Ecopetrol, Ecopetrol, Santafé de Bogotá, 2006.
80. Acevedo, H., Arias, O., Caracterización de un motor de combustión interna por ignición utilizando como combustible mezcla de gasolina corriente con etanol al diez por ciento (10 %) en volumen (E10), Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2005.
81. Worapon Kiatkittipong, Piyaporn Thipsunet, Shigeo Goto, Choowong Chaisuk, Piyasan Prasertdamb, Suttichai Assabumrungrat, Simultaneous enhancement of ethanol supplement in gasoline and its quality improvement, 2008, Fuel Processing Technology, Vol. 89, págs. 1365 – 1370.
82. Martínez, Isidoro, Termodinámica básica y aplicada, Editorial Dossat, 1992.
83. Bhale, P., Deshpande, N., Thombre, S., Improving the low temperature properties of biodiesel fuel, 2009, Renewable Energy , Vol. 34, págs. 794–800.
84. Barroso, Ballester, Pina, Some considerations about bioethanol combustion in oil-fired boilers, 2010, Fuel Processing Technology.
85. Nan Z, Tan ZC, Sun L., Investigation on thermodynamic properties of ethanol+gasoline blended fuel, 1, 2004, Energy and Fuels, Vol. 18, págs. 84–89.
86. Benavides, Benjumea, Agudelo, El fraccionamiento por cristalización del biodiesel de aceite de palma como alternativa para mejorar sus propiedades de flujo a baja temperatura, Marzo de 2008, Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, Vol. 43, págs. 7-17.
87. Piloto Rodríguez, R. Sierens, S. Verhelst, N. Ferrer Frontela, Evaluación del funcionamiento de motores de combustión interna trabajando con biodiesel, La Habana, 2008, Ingeniería Mecánica, Vol. 3, págs. 33-38.
88. Zapata, C., Martínez, I., Arenas, E., Hemaó, C., Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos, 151, Medellín, 2007, Dyna rev.fac.nac.minas, Vol. 74.
89. Srivastava, A., Prasad, R., Triglycerides-based diesel fuels, 2000, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 4, pág. 111±133.
90. Yage Di, C.S. Cheung, Zuohua Huang, Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with ultra-low sulfur diesel fuel blended with biodiesel from waste cooking oil, 2009, Science of the total environment, Vol. 407, págs. 835 – 846.
91. Ejim, C., Fleck, B., Amirfazli, A., Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: Surface tension and viscosity effects, 2007, Fuel, Vol. 86, págs. 1534–1544.
92. Alptekin, E., Canakci, M., Determination of the density and the viscosities of biodiesel– diesel fuel blends, 2008, Renewable Energy, Vol. 33, págs. 2623– 2630.

93. Rodríguez, L., Sarmiento, J., Vidales, H. Prueba de choque termico entre biodiesel y diesel a diferentes temperaturas. ICP, Ecopetrol. Bucaramanga, 2007.
94. Rosa do Nascimento, M., Silva, E., Sierra, G., Rendón, M., El biodiesel de palma como combustible para microturbinas a gas: Una evaluación experimental, 2006, Biomassa & Energia, Vol. 3, págs. 73-82.
95. Zheng, M., Mulenga, M., Reader, G., Wang, M., Ting, D., Tjong, J., Biodiesel engine performance and emissions in low temperature combustion, 2008, Fuel , Vol. 87, págs. 714–722.
96. Knothe, G., Steidley, K., Viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components, 2005, Fuel, Vol. 84, págs. 1059–1065.
97. Ortiz, Felipe, Modelado del efecto de la viscosidad en la combustión de la mezcla B20 de biodiesel de palma africana en motores de combustión interna encendidos por compresión, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, 2010, Tesis de maestría en Ingeniería Mecánica.
98. Bangboye, A, Hansen, A. C., Prediction of cetane number of biodiesel fuel from the fatty acid methyl ester (FAME) composition, 1, 2008, Int. Agrophysics, Vol. 22, págs. 21-29.
99. Lin, Y.C., Lee, C.F., Fang, T., Characterization of particle size distribution from diesel engines fueled with palm-biodiesel blends and paraffinic fuel blends, 2008, Atmospheric Environment , Vol. 42 , págs. 1133–1143.
100. Imahara, H., Miinami, E., Saka, S., Thermodynamic study on cloud point of biodiesel with its fatty acid composition, 12-13, September de 2006, Fuel, Vol. 85, págs. 1666-1670.
101. García, M., Gonzalo, A., Sánchez, J., Arauzo, J., Peña, J., Prediction of normalized biodiesel properties by simulation of multiple feedstock blends, 2010, Bioresource Technology , Vol. 101, págs. 4431–4439.
102. Aziz, A., Said, M., Awang, M. Performance and Emission Evaluations of Palm Oil-Based Biodiesels with Conventional Diesel using Single Cylinder Direct Injection Engine, 2005, Technical Paper .
103. Dzida, M., Prusakiewicz, P., The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel, 2008, Fuel, Vol. 87, págs. 1941–1948.
104. Mantilla, J. M., Modelado de la combustión de mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia . Medellín : s.n., 2011, Tesis Doctoral en Ingeniería-Sistemas Energéticos.
105. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, CETESB, Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2005, Sao Paulo, 2006.
106. Al-Hasan, M., Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. 2003, Energy Conversion and Management , Vol. 44 , págs. 1547–1561.
107. Health Effects Institute, The potential health effects of oxygenates added to gasoline: a review of the current literature, Cambridge, 1996.

108. Najafi, G, Ghobadian, B., Tavakoli, T., Buttsworth, D., Yusaf, T., Faizollahneja, M., Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network, 2009, *Applied Energy* , Vol. 86, págs. 630–639.
109. Gómez, J., Samaniego, J., Antonissen, M., Consideraciones ambientales en torno a los biocombustibles líquidos, 137, Santiago de Chile, Naciones Unidas, Julio de 2008, Cepal - Serie Medio ambiente y desarrollo, págs. 1-52.
110. Gaffney, J. S., Marley, N. A., The impacts of combustion emissions on air quality and climate – From coal to biofuels and beyond, 2009, *Atmospheric Environment*, Vol. 43, págs. 23–36.
111. Tanner, R.L., Miguel, A.H., deAndrade, J.B., Gaffney, J.S., Streit, G.E., Atmospheric chemistry of aldehydes: Enhanced peroxyacetyl nitrate formation from ethanol-fueled vehicular emissions, 1988, *Environmental Science and Technology*, Vol. 22, págs. 1026–1034.
112. Gaffney, J.S., Marley, N.A., Martin, R.S., Dixon, R.W., Reyes, L.G., Popp, C.J., Potential air quality effects of using ethanol-gasoline fuel blends: a field study in Albuquerque, New Mexico, 1997, *Environmental Science and Technology*, Vol. 31, págs. 3053–3061.
113. Singleton, D.L., Britton, A., Jiang, W., McLaren, R., Lamy, S., Primary and secondary air toxics from gasoline-alcohol transportation fuels, 1998, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 20, págs. 263–273.
114. EPA, A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions, 2002.
115. Kalam, K., Masjuki, H., Biodiesel from palmoil—an analysis of its properties and potential, 2002, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 23, págs. 471 – 479.
116. Kim, H., Choi, B., The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel engine, 2010, *Renewable Energy* , Vol. 35, págs. 157–163.
117. Lin, Y., Wu, Y., Chang, C., Combustion characteristics of waste-oil produced biodiesel/diesel fuel blends, 2007, *Fuel* , Vol. 86 , págs. 1772–1780.
118. Lin, Y., Leea, W., Houa, H., PAH emissions and energy efficiency of palm-biodiesel blends fueled on diesel generator, 2006, *Atmospheric Environment*, Vol. 40, págs. 3930–3940.
119. Ng, H., Gan, S., Combustion performance and exhaust emissions from the non-pressurised combustion of palm oil biodiesel blends, 2010, *Applied Thermal Engineering* , Vol. 30, págs. 2476-2484.
120. Hoogwijk, M., Faaija, A., Van den Broeka, R., Berndes, G., Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy, 2003, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25 , págs. 119 – 133.
121. Escobar, J., Lora, E., Venturini, O., Yañez, E., Castillo, E., Almazan, O., Biofuels: Environment, technology and food security, 2009, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, págs. 1275–1287.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	6
3.	OBJETIVOS .....	11
3.1	Objetivo General .....	11
3.2	Objetivos Específicos .....	11
4.	MARCO TEORICO.....	12
4.1	Biocombustibles .....	12
4.2	Bioetanol.....	15
4.2.1	Definición .....	16
4.2.2	Materias primas.....	16
4.2.3	Ventajas del uso del etanol .....	17
4.2.4	Inconvenientes del uso del etanol como combustible .....	18
4.2.5	Mezclas de etanol y gasolina.....	19
4.2.6	Tecnologías de producción de bioetanol .....	20
4.2.7	Calidad del bioetanol .....	22
4.2.8	Demanda de bioetanol.....	23
4.2.9	El bioetanol en el mundo .....	25
4.2.10	El bioetanol en Colombia .....	26
4.3	Biodiesel.....	28
4.3.1	Definición .....	28
4.3.2	Materias primas.....	28
4.3.3	Parámetros de calidad .....	31
4.3.4	Composición del biodiesel.....	38
4.3.5	Desempeño del biodiesel en el motor .....	40
4.3.6	Emisiones del biodiesel .....	41
4.3.7	Ventajas del uso del biodiesel .....	41
4.3.8	Desventajas del uso del biodiesel.....	42
4.3.9	Producción mundial de biodiesel.....	44
4.3.10	Reacción de transesterificación.....	44
4.3.11	Tecnologías para la producción de biodiesel .....	45
4.3.12	Purificación del biodiesel .....	50
4.3.13	Aprovechamiento de la glicerina .....	52
4.3.14	El biodiesel en Colombia .....	52

4.4	Impacto ambiental de los biocombustibles .....	53
4.5	Antecedentes y estado del arte .....	55
5.	METODOLOGIA .....	60
5.1	Desarrollo de los métodos analíticos para calcular propiedades termofísicas de las mezclas de biocombustibles.....	60
5.1.1	Densidad.....	61
5.1.2	Gravedad API .....	62
5.1.3	Composición elemental.....	62
5.1.4	Relación C/H .....	63
5.1.5	Aire teórico.....	63
5.1.6	Viscosidad.....	64
5.1.7	Poder calorífico superior .....	66
5.1.8	Conductividad térmica .....	68
5.1.9	Número de cetano .....	69
5.1.10	Punto de nube .....	69
5.1.11	Capacidad calorífica .....	70
5.1.12	Número de Prandtl .....	71
5.1.13	Temperatura de Inflamación.....	72
5.1.14	Validación de ecuaciones .....	72
5.2	Simulación matemática de la combustión de los biocombustibles .....	72
5.2.1	Producción de gases de combustión .....	72
5.2.2	Capacidad calorífica .....	73
5.2.3	Viscosidad.....	73
5.2.4	Conductividad térmica .....	73
5.2.5	Número de Prandtl .....	74
5.3	Estimación del impacto ambiental producido por el uso de biocombustibles.....	74
5.4	Diseño conceptual de un laboratorio para la certificación de los biocombustibles ...	75
6.	ESTIMACION DE PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ETANOL – GASOLINA.....	76
6.1	Estimación de la densidad del bioetanol y sus mezclas.....	76
6.2	Gravedad API.....	78
6.3	Estimación de la composición del bioetanol y sus mezclas .....	78
6.3.1	Análisis elemental de los componentes puros .....	78
6.3.2	Análisis elemental de las mezclas etanol - gasolina.....	80
6.3.3	Relación C/H de las mezclas .....	82
6.4	Cálculo del aire teórico requerido para la combustión .....	83

6.5	Viscosidad de las mezclas etanol – gasolina .....	84
6.6	Cálculo del poder calorífico de las mezclas de etanol .....	87
6.7	Conductividad de las mezclas etanol – gasolina .....	88
6.8	Capacidad calorífica del etanol y sus mezclas.....	89
6.9	Número de Prandtl del etanol y sus mezclas .....	90
6.10	Temperatura de inflamación.....	90
7.	ESTIMACION DE PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BIODIESEL – DIESEL.....	92
7.1	Densidad .....	92
7.1.1	Densidad promedio molar.....	92
7.1.2	Ecuación de Rackett.....	93
7.2	Gravedad API.....	97
7.3	Estimación del análisis elemental .....	97
7.3.1	Análisis elemental del biodiesel de palma .....	97
7.3.2	Análisis elemental de las mezclas biodiesel - diesel .....	99
7.3.3	Relación C/H .....	101
7.4	Aire teórico requerido para la combustión.....	102
7.5	Viscosidad .....	103
7.5.1	Viscosidad del biodiesel de palma .....	103
7.5.2	Viscosidad de las mezclas biodiesel – diesel .....	105
7.6	Poder calorífico .....	106
7.7	Número de cetano.....	107
7.8	Punto de nube del biodiesel de palma .....	109
7.9	Conductividad térmica.....	110
7.10	Capacidad calorífica.....	111
7.10.1	Capacidad calorífica del biodiesel de palma .....	111
7.10.2	Capacidad calorífica de las mezclas biodiesel – diesel.....	111
7.11	Numero de Prandtl .....	112
7.12	Temperatura de inflamación.....	113
8.	SIMULACION DE LA COMBUSTION DE LAS MEZCLAS ETANOL – GASOLINA .....	115
8.1	Productos de la combustión.....	115
8.2	Capacidad calorífica.....	118
8.3	Viscosidad .....	119
8.4	Conductividad térmica.....	120
8.5	Número de Prandtl .....	121
9.	SIMULACION DE LA COMBUSTION DE LAS MEZCLAS BIODIESEL – DIESEL.....	122

9.1	Productos de la combustión.....	122
9.2	Capacidad calorífica.....	125
9.3	Viscosidad .....	126
9.4	Conductividad térmica.....	127
9.5	Número de Prandtl .....	127
10.	IMPACTO AMBIENTAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES Y SUS MEZCLAS.....	129
10.1	Impacto ambiental de las mezclas bioetanol – gasolina .....	129
10.1.1	Estimación del impacto ambiental por masa de combustible .....	129
10.1.2	Estimación del impacto ambiental por energía producida. ....	130
10.1.3	Corrección del CO <sub>2</sub> de biomasa .....	131
10.1.4	Otras emisiones de las mezclas bioetanol – gasolina .....	132
10.2	Impacto ambiental de las mezclas biodiesel – diesel .....	134
10.2.1	Estimación del impacto ambiental por masa de combustible .....	134
10.2.2	Estimación del impacto ambiental por energía producida. ....	135
10.2.3	Corrección del CO <sub>2</sub> de biomasa .....	135
10.2.4	Otras emisiones de las mezclas biodiesel - diesel .....	137
10.3	Otros impactos asociados al uso de biocombustibles.....	141
11	DISEÑO CONCEPTUAL DE UN LABORATORIO PARA LA CERTIFICACION DE LA CALIDAD DE BIOCOMBUSTIBLES .....	144
11.1	Norma técnica colombiana NTC 5308 para el etanol.....	144
11.2	Norma técnica colombiana NTC 5444 para el biodiesel.....	144
11.3	Laboratorio de combustión.....	146
12	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	147
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	150

## INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Emisiones de gases con etanol .....	14
Tabla 4.2. Emisiones de gases con biodiesel expresadas en g/kg de combustible .....	14
Tabla 4.3. Métodos de pretratamiento de material lignocelulósico .....	21
Tabla 4.4. Parámetros de calidad del bioetanol .....	23
Tabla 4.5. Propiedades del biodiesel y el diesel .....	36
Tabla 4.6. Parámetros internacionales de calidad del biodiesel .....	37
Tabla 4.7. Especificaciones de Calidad del Biodiesel (Norma Técnica Colombiana NTC 5444).....	38
Tabla 5.1 Propiedades y parámetros estimados a las mezclas de biocombustibles .....	60
Tabla 5.2 Correlaciones para estimar la viscosidad de mezclas líquidas .....	64
Tabla 5.3. Correlaciones para el cálculo del calor específico superior .....	67
Tabla 6.1. Composición volumétrica, másica y molar de la mezcla E10.....	76
Tabla 6.2. Fracciones molares de las mezclas etanol-gasolina.....	77
Tabla 6.3. Densidad relativa y °API para mezclas de etanol - gasolina .....	78
Tabla 6.4. Análisis elemental de los componentes puros de las mezclas.....	79
Tabla 6.5. Masa de los componentes en la Mezcla E10.....	80
Tabla 6.6. Relación C/H de las mezclas etanol - gasolina.....	82
Tabla 6.7. Oxígeno y Aire teórico requerido por las mezclas etanol-gasolina. ....	83
Tabla 6.8. Desviación promedio de las estimaciones realizadas.....	91
Tabla 7.1. Composición típica del biodiesel de palma.....	92
Tabla 7.2. Composición molar del biodiesel de palma.....	92
Tabla 7.3. Propiedades críticas de los metilésteres del biodiesel .....	93
Tabla 7.4. Propiedades críticas del biodiesel .....	93
Tabla 7.5. Composición másica y molar de las mezclas biodiesel-diesel .....	95
Tabla 7.6. Densidades de las mezclas biodiesel-diesel .....	95
Tabla 7.7. Densidad relativa y °API para diferentes mezclas de biodiesel.....	97
Tabla 7.8. Análisis elemental de los componentes del biodiesel. ....	98
Tabla 7.9. Masa de los componentes en la Mezcla B10 .....	99
Tabla 7.10. Relación C/H de las mezclas biodiesel - diesel .....	101
Tabla 7.11. Aire teórico requerido por las mezclas biodiesel-diesel. ....	102
Tabla 7.12. Viscosidad del biodiesel y sus componentes.....	103
Tabla 7.13. Número de cetano de los componentes del biodiesel .....	107
Tabla 7.14. Capacidad calorífica de los metilésteres y el biodiesel de palma.....	111
Tabla 7.15. Temperatura de Inflamación de los metilésteres y del biodiesel de palma .....	113
Tabla 7.16. Desviación promedio respecto a los datos experimentales.....	114
Tabla 8.1. Constantes para el cálculo de $C_p$ para los gases de combustión .....	118
Tabla 8.2. Viscosidad de los gases de combustión .....	119
Tabla 8.3. Conductividad térmica de los gases de combustión.....	120
Tabla 11.1. Parámetros de calidad del etanol NTC 5308 .....	144
Tabla 11.2. Parámetros de calidad del biodiesel NTC 5444 .....	144
Tabla 12.1. Ecuaciones usadas para las mezclas etanol - gasolina.....	147
Tabla 12.2. Ecuaciones usadas para las mezclas biodiesel - diesel.....	148

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Uso de fuentes de energía a nivel mundial.....	6
Figura 1.2. Uso de fuentes de energía en Colombia.....	6
Figura 4.1. Procesos de obtención de bioetanol.....	20
Figura 4.2. Consumo de gasolina en América Latina.....	23
Figura 4.3. Demanda de etanol para E10.....	24
Figura 4.4. Producción de etanol en América Latina.....	24
Figura 4.5. Producción de etanol en el mundo en 2007.....	25
Figura 4.6. Plantas de bioetanol en Colombia.....	28
Figura 4.7. Composición típica de aceites y grasas.....	40
Figura 4.8. Proceso de obtención de biodiesel.....	52
Figura 4.9. Plantas de biodiesel en Colombia.....	53
Figura 4.10. Impacto ambiental de los biocombustibles.....	54
Figura 4.11. Publicaciones anuales sobre bioetanol en Scienedirect.....	55
Figura 4.12. Publicaciones anuales sobre biodiesel en Scienedirect.....	56
Figura 6.1. Densidad de las mezclas etanol – gasolina estimada y reportada.....	77
Figura 6.2. Análisis elemental de los componentes puros de las mezclas etanol-gasolina.....	80
Figura 6.3. Análisis elemental másico de mezclas de etanol.....	81
Figura 6.4. Análisis elemental molar de mezclas de etanol.....	82
Figura 6.5. Aire teórico requerido para mezclas etanol-gasolina.....	84
Figura 6.6. Viscosidad estimada para mezclas etanol-gasolina.....	85
Figura 6.7. Viscosidad estimada y experimental para mezclas etanol-gasolina.....	86
Figura 6.8. Viscosidad estimada para mezclas etanol-gasolina a 20 y 40°C.....	86
Figura 6.9. Poder calorífico superior estimado para mezclas etanol-gasolina.....	87
Figura 6.10. Poder calorífico superior estimado y valores reportados.....	88
Figura 6.11. Conductividad térmica de mezclas bioetanol-gasolina.....	89
Figura 6.12. Capacidad calorífica de mezclas bioetanol-gasolina.....	89
Figura 6.13. Número de Prandtl de mezclas bioetanol-gasolina.....	90
Figura 6.14. Temperatura de inflamación de mezclas bioetanol-gasolina.....	91
Figura 7.1. Densidad del biodiesel de palma según literatura.....	94
Figura 7.2. Densidad de diferentes mezclas de diesel-biodiesel.....	96
Figura 7.3. Análisis elemental másico de mezclas de biodiesel.....	100
Figura 7.4. Análisis elemental molar de mezclas de biodiesel.....	101
Figura 7.5. Viscosidad estimada para el biodiesel de palma.....	104
Figura 7.6. Viscosidad reportada para el biodiesel de palma.....	104
Figura 7.7. Viscosidad estimada y experimental de mezclas de biodiesel – diesel.....	105
Figura 7.8. Poder calorífico superior estimado de las mezclas biodiesel - diesel.....	106
Figura 7.9. Poder calorífico superior estimado y reportado para mezclas biodiesel – diesel...	107
Figura 7.10. Número de cetano estimado y reportado para el biodiesel de palma.....	108
Figura 7.11. Número de cetano de mezclas biodiesel – diesel.....	109
Figura 7.12. Puntos de nube estimados y reportados para el biodiesel de palma.....	110
Figura 7.13. Conductividad térmica de mezclas biodiesel – diesel.....	110
Figura 7.14. Capacidad calorífica de mezclas biodiesel – diesel.....	112
Figura 7.15. Número de Prandtl de las mezclas biodiesel – diesel.....	112
Figura 7.16. Temperatura de Inflamación del biodiesel de palma estimado y reportado.....	113
Figura 7.17. Temperatura de Inflamación de las mezclas biodiesel - diesel.....	114
Figura 8.1. Emisiones de CO <sub>2</sub> para cada mezcla.....	115
Figura 8.2. Emisiones de vapor de H <sub>2</sub> O para cada mezcla.....	116

Figura 8.3. Emisiones de SO <sub>2</sub> para cada mezcla .....	116
Figura 8.4. Emisiones de N <sub>2</sub> para cada mezcla y relaciones de exceso de aire .....	117
Figura 8.5. Emisiones de O <sub>2</sub> para cada mezcla y relaciones de exceso de aire .....	117
Figura 8.6. Capacidad calorífica a 400K de los productos de la combustión .....	119
Figura 8.7. Viscosidad de los productos de combustión.....	120
Figura 8.8. Conductividad de los productos de combustión.....	121
Figura 8.9. Número de Prandtl de los productos de combustión .....	121
Figura 9.1. Emisiones de CO <sub>2</sub> para cada mezcla .....	122
Figura 9.2. Emisiones de vapor de H <sub>2</sub> O para cada mezcla .....	123
Figura 9.3. Emisiones de SO <sub>2</sub> para mezclas biodiesel - diesel .....	123
Figura 9.4. Emisiones de N <sub>2</sub> para cada mezcla y relaciones de exceso de aire .....	124
Figura 9.5. Emisiones de O <sub>2</sub> para cada mezcla y relaciones de exceso de aire .....	124
Figura 9.6. Capacidad calorífica a 400K de los gases de combustión .....	125
Figura 9.7. Viscosidad de los productos de combustión.....	126
Figura 9.8. Conductividad de los productos de combustión.....	127
Figura 9.9. Número de Prandtl de los productos de combustión .....	128
Figura 10.1. Impacto ambiental por kg de combustible .....	130
Figura 10.2. Impacto ambiental por GJ de energía.....	130
Figura 10.3. Impacto ambiental por energía con corrección de CO <sub>2</sub> .....	131
Figura 10.4. Porcentaje de reducción de emisiones.....	132
Figura 10.5. Impacto ambiental por kg de combustible .....	134
Figura 10.6. Impacto ambiental por GJ de energía.....	135
Figura 10.7. Impacto ambiental por GJ de energía con corrección de CO <sub>2</sub> .....	136
Figura 10.8. Porcentaje de reducción de emisiones.....	136
Figura 10.9. Porcentaje de reducción de emisiones de acuerdo al modelo de la EPA.....	138

## ABREVIATURAS

$\varphi$ :	Cualquier propiedad
x:	Fracción molar
y:	Fracción másica
$\rho$ :	Densidad
P:	Presión
T:	Temperatura
$Z_{RA}$ :	Constante de Rackett
R:	Constante universal de los gases
$^{\circ}API$ :	Gravedad API
$\mu$ :	Viscosidad dinámica
$\nu$ :	Viscosidad cinemática
G:	Parámetro de interacción entre dos componentes
n:	Número de componentes en la mezcla
M:	Peso molecular
A:	Contenido en peso de cenizas
k:	Conductividad térmica
V:	Volumen molar
$\phi$ :	Parámetro de interacción para la conductividad de una mezcla
CN:	Número de cetano
PN:	Punto de nube
X:	Contenido másico de metilésteres insaturados
Cp:	Capacidad calorífica
Pr:	Número adimensional de Prandtl
Z:	Número de átomos de carbono
AAD:	Desviación media absoluta
NP:	Número de puntos experimentales
$\lambda$ :	Coefficiente de exceso de aire

### Subíndices

m:	Mezcla
i,j:	Componentes
c:	Propiedad crítica
r:	Propiedad reducida
rel:	Relativa
MP:	Metilpalmitato
exp:	Experimental
pr:	Predicho

### Superíndices

b:	Propiedad en el punto de ebullición
----	-------------------------------------

## LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1. Parámetros Norma NTC 5308
- ANEXO 2. Parámetros Norma NTC 5444
- ANEXO 3. Laboratorio de Calidad de Biocombustibles
- ANEXO 4. Laboratorio de Desempeño de Motores
- ANEXO 5. Laboratorio de Desempeño en una Cámara de Combustión
- ANEXO 6. Hojas de Cálculo
- ANEXO 7. Datos referencias