

**INFLUENCIA DE FACTORES DE ALMACENAMIENTO EN LA ESTABILIDAD  
QUÍMICA DE BIODIESEL DE PALMA**

**DANIEL ALEJANDRO BRAVO MURILLO  
MANUEL FERNANDO MONTES BERNAL**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ, D.C.  
Marzo 08 de 2016**

**ENERGÍAS ALTERNATIVAS**

**INFLUENCIA DE FACTORES DE ALMACENAMIENTO EN LA ESTABILIDAD  
QUÍMICA DE BIODIESEL DE PALMA**

**DANIEL ALEJANDRO BRAVO MURILLO** Cód. 064082073  
**MANUEL FERNANDO MONTES BERNAL** Cód. 064081046

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Directora: **LUISA FERNANDA NAVARRETE**  
Química MSc

**UNIVERSIDAD LIBRE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**BOGOTÁ, D.C.**  
**Marzo 08 de 2016**

## **Nota de aceptación**

El trabajo de grado titulado “INFLUENCIA DE FACTORES DE ALMACENAMIENTO EN LA ESTABILIDAD QUÍMICA DE BIODIESEL DE PALMA” realizado por los estudiantes DANIEL ALEJANDRO BRAVO MURILLO y MANUEL FERNANDO MONTES BERNAL y con códigos 064082073 y 064081046 respectivamente, cumple con todos los requisitos legales exigidos por la universidad libre para optar al título de ingeniero ambiental.

---

Firma del Director de Proyecto

---

Firma del jurado 1

---

Firma del jurado 2

Bogotá, Enero 25 de 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros padres por su comprensión y ayuda en los momentos difíciles, a los que fueron maestros y supieron hacer labor de guiarnos y enseñarnos, a todas aquellas personas que directa o indirectamente ayudaron a que este trabajo fuese posible.

A nuestra directora, Luisa Fernanda Navarrete quien nos guió y orientó durante la ejecución del proyecto.

## RESUMEN

Con el propósito de establecer la influencia de factores de almacenamiento en la estabilidad oxidativa del biodiesel de palma, se llevaron a cabo ensayos experimentales almacenando muestras de biodiesel de palma durante cuatro meses, aplicando un diseño experimental factorial  $2^3$  cuyas variables de estudio luz, humedad y temperatura fueron estudiadas en nivel alto que implicaba la presencia de humedad, luz y temperatura de 30 °C, así como nivel bajo representado por ausencia de humedad, luz y una temperatura de 20 °C. Se evaluaron periódicamente propiedades físicas como viscosidad, densidad y químicas como índice de acidez y corrosión a la lámina de cobre. Adicionalmente se determinó poder calorífico como ensayo relacionado con la calidad del biodiesel y análisis FTIR para identificar la presencia de peróxidos en las muestras.

Los datos obtenidos fueron analizados a través del método de análisis de varianza estadístico ANOVA, el cual permitió establecer que las mejores condiciones de almacenamiento se encuentran a una temperatura de 30°C, en ausencia de luz y bajo porcentaje de humedad, garantizando que la estabilidad del biocombustible se puede mantener en adecuados niveles de calidad con respecto a sus propiedades físicas y químicas.

**Palabras claves:** Biodiesel, palma, oxidación, estabilidad, almacenamiento, biocombustible.

## ABSTRACT

In order to establish the influence of factors in the oxidative stability of stored biodiesel palm, there were placed out experimental tests by the storage of samples of palm biodiesel for four months, using a factorial experimental design with 23 samples with different variables of light, moisture and temperature, they were studied adding an extra level of moisture including light and a temperature of 30 ° C and low level represented by the absence of moisture, light and temperature of 20 ° C. Physical properties such as viscosity, density and chemical stability and acid number and corrosion to the copper foil were evaluated periodically. Additionally calorific assay was determined as related directly to the quality of biodiesel and FTIR analysis to identify the presence of peroxides in the samples.

The obtained data were analyzed by the method of statistical analysis ANOVA, which established that the best storage conditions are at a temperature of 30 ° C, without the presence of light and low humidity, ensuring that biofuel stability can be maintained at optimal levels of quality regarding to their physical and chemical properties.

**Keywords:** Biodiesel, palm, oxidation, stability, storage, biofuel.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>12</b>
<b>4.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>MARCO REFERENCIAL</b> .....	<b>13</b>
<b>5.1</b>	<b>MARCO HISTÓRICO</b> .....	<b>13</b>
5.1.1	<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>14</b>
<b>5.2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
5.2.1	<b>CALIDAD DEL BODIESEL</b> .....	<b>16</b>
5.2.2	<b>FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL BODIESEL</b> .....	<b>16</b>
5.2.3	<b>ESTABILIDAD QUÍMICA</b> .....	<b>17</b>
<b>5.3</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>19</b>
5.3.1	<b>BIOCOMBUSTIBLE</b> .....	<b>19</b>
5.3.2	<b>BODIESEL DE PALMA</b> .....	<b>19</b>
5.3.3	<b>ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN</b> .....	<b>20</b>
5.3.4	<b>ÍNDICE DE ACIDEZ</b> .....	<b>20</b>
5.3.5	<b>CONTENIDO DE AGUA</b> .....	<b>20</b>
5.3.6	<b>ÍNDICE DE PERÓXIDOS</b> .....	<b>20</b>
5.3.7	<b>ÍNDICE DE YODO</b> .....	<b>21</b>
5.3.8	<b>VISCOSIDAD CINEMÁTICA</b> .....	<b>21</b>
5.3.9	<b>CONTAMINACIÓN TOTAL</b> .....	<b>21</b>
5.3.10	<b>ALMACENAMIENTO A LARGO PLAZO</b> .....	<b>21</b>
5.3.11	<b>CORROSIÓN EN LÁMINA DE COBRE</b> .....	<b>21</b>
<b>5.4</b>	<b>MARCO LEGAL</b> .....	<b>22</b>
5.4.1	<b>NORMATIVIDAD INTERNACIONAL</b> .....	<b>22</b>
5.4.2	<b>NORMATIVIDAD NACIONAL</b> .....	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	<b>24</b>
<b>6.1</b>	<b>FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD QUÍMICA DEL BODIESEL</b> ...24	

6.2	ESTIMACIÓN DE CONDICIONES ADECUADAS DE ALMACENAMIENTO DEL BIOCOMBUSTIBLE.....	25
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
7.1	PARÁMETROS DE CALIDAD CON RESPECTO A CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO.....	27
7.1.1	ÍNDICE DE ACIDEZ.....	27
7.1.2	DENSIDAD.....	29
7.1.3	VISCOSIDAD.....	30
7.1.4	CORROSIÓN LÁMINA DE COBRE.....	32
7.1.5	PODER CALORIFICO.....	33
7.1.6	PRESENCIA DE PERÓXIDOS.....	34
8	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	37
8.1	ESTIMACIÓN DE CONDICIONES ADECUADAS DE ALMACENAMIENTO DEL BIOCOMBUSTIBLE.....	37
9	CONCLUSIONES.....	39
10	RECOMENDACIONES.....	40
11	BIBLIOGRAFÍA.....	41
12	ANEXOS.....	49



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Propiedades físicas y químicas del biocombustible</i> .....	24
<b>Tabla 2.</b> <i>Metodología de muestreo y condiciones ambientales</i> .....	25
<b>Tabla 3.</b> <i>Parámetros físicos y químicos iniciales biodiesel</i> .....	26
<b>Tabla 4.</b> <i>Resultados de muestreo de la corrosión a Lámina de Cobre</i> .....	32
<b>Tabla 5.</b> <i>Comparación poder calorífico biodiesel experimental, biodiesel teórico y diésel teórico</i> .....	34
<b>Tabla 6.</b> <i>Análisis estadístico ANOVA</i> .....	37
<b>Tabla 7.</b> <i>Propiedades evaluadas en el análisis estadístico</i> .....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> <i>Mecanismo de auto oxidación: i) iniciación, ii) propagación y iii) terminación.</i> .....	18
---	----

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> <i>Comportamiento índice de acidez a través de tiempo de muestreo</i> .....	27
<b>Gráfica 2.</b> <i>Comportamiento densidad a través de tiempo de muestreo</i> .....	29
<b>Gráfica 3.</b> <i>Comportamiento Viscosidad cinemática a través de tiempo de muestreo</i> .....	31
<b>Gráfica 4.</b> <i>Comportamiento poder calorífico a través del tiempo de muestreo</i> .....	33
<b>Gráfica 5.</b> <i>Espectros FTIR determinación de peróxidos en la muestra 6a</i> .....	35
<b>Gráfica 6.</b> <i>Espectro FTIR determinación de peróxidos en la muestra 8a</i> .....	36

## ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1. Resultados para índice de acidez bajo condiciones de almacenamiento</i>	49
<i>Anexo 2. Resultados para densidad bajo condiciones de almacenamiento</i>	49
<i>Anexo 3. Resultados para viscosidad bajo condiciones de almacenamiento</i>	50
<i>Anexo 4. Resultados para lámina de cobre bajo condiciones de almacenamiento</i>	50
<i>Anexo 5. Guía estándar para identificación de lámina cobre (ASTM D 130)</i>	51
<i>Anexo 6. Resultados para la determinación del poder calorífico</i>	51
<i>Anexo 7. Análisis estadístico viscosidad</i>	52
<i>Anexo 8. Análisis estadístico densidad</i>	52
<i>Anexo 9. Análisis estadístico índice de acidez</i>	53
<i>Anexo 10. Valores p y F para los experimentos 1 a 8 del análisis de varianza con significativa en el nivel 0.05.</i>	53

## 1 INTRODUCCIÓN

La preocupación mundial por el cambio climático y la contaminación producida por las emisiones atmosféricas derivadas de automotores que utilizan petrodiesel, junto con el elevado precio del petróleo han sido las principales causas para realizar investigaciones encaminadas a la búsqueda de energías alternativas, de tal manera que el biodiesel se ha convertido en una de las principales opciones como reemplazo de los combustibles convencionales (Quiroz, 2011).

En la actualidad la producción de biodiesel gira en torno a la extracción de aceite a partir del fruto de palma africana, cultivo caracterizado por ser de mayor productividad por hectárea/año, además de precio bajo y estable a nivel mundial, convirtiéndose económicamente en la fuente más viable para la obtención del biocombustible (Tang, Wang, & Salley, 2008).

El biodiesel de palma presenta ventajas de rendimiento en los motores debido a sus características, las cuales se ven reflejadas en una buena ignición y desempeño del biocombustible sin embargo, durante el almacenamiento éste sufre procesos de auto oxidación lo cual genera una reducción en términos de calidad cuando se evidencia influencia de ciertas variables como temperatura, luz y humedad (Lin & Chiu, 2010), por tanto resulta necesario evaluar la incidencia de dichos factores en la estabilidad química del biodiesel de palma, a través de ensayos experimentales que permitan determinar la calidad del biocombustible, evaluando parámetros físicos y químicos exigidos en normas nacionales (NTC) e internacionales (ASTM).

## 2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los principales problemas del biodiesel es su estabilidad química durante almacenamiento por largos períodos de tiempo, donde éste no sólo se encuentra en contacto con materiales propios de los contenedores (Zuletal, Baenall, Riosl, & CalderónII, 2012), sino también expuesto a diferentes condiciones ambientales, lo cual va a producir reacciones de oxidación (Rodríguez, Sierra, & Cantor, 2010), formación de ácidos indeseables y por ende depósitos en los tanques que pueden causar la obstrucción de filtros de combustible en los sistemas de inyección en motores diésel (Focke, Nshoane, derWesthuizen, Lofté, Reddy, & luyt, 2011), disminuyendo significativamente la calidad del biocombustible, no sólo en términos energéticos sino también ambientales ya que en el momento de la combustión, se genera un incremento de emisiones atmosféricas contaminantes, gases de efecto invernadero como lo son monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV, especialmente aldehídos). Así mismo la producción de material particulado y aumento de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) (Augusto & Cuéllar, 2007), los cuales debido a su alta reactividad contribuyen con la formación de lluvia ácida y smog (Pattamaprom, Pakdee, & Ngamjaroen, 2012).

### 3 JUSTIFICACIÓN

El uso de combustibles derivados del petróleo así como variación de precios, han motivado la búsqueda de alternativas que disminuyan el impacto ambiental y la dependencia global de fuentes de energía de carácter fósil (Quiroz, 2011), es por ello que los combustibles derivados de fuentes naturales y renovables se han contemplado como una buena opción, ya que además de ofrecer beneficios ambientales, representan ventajas económicas al estimular considerablemente el incremento en producción (Tang, Wang, & Salley, 2008).

Sin embargo, uno de los mayores inconvenientes que presentan los biocombustibles es su tendencia a degradarse debido a su composición química, quedando así expuestos a reacciones de oxidación por contacto con oxígeno del aire, humedad o agua que se encuentren en los sistemas de almacenamiento (Lin & Chiu, 2010), por lo que las investigaciones tanto a nivel nacional como internacional, se han encaminado a mejorar la calidad y el desempeño del biodiesel (Benjumea, Pedro; Agudelo, John; Ríos, Luis, 2007).

En Colombia el incremento de cultivos de palma como fuente principal en la producción de biocombustibles (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, 2013), se debe no sólo al alto contenido de cadenas de ácidos grasos que presenta este aceite vegetal, sino también a que se encuentra más disponible en comparación con otras opciones (Knote, 2007), resultando por lo tanto de vital importancia estudiar y establecer condiciones de almacenamiento que representen estabilidad química con el propósito de dar cumplimiento a los diferentes estándares de calidad.

La universidad Libre como institución académica que se involucra y brinda solución a diversas problemáticas de índole nacional, ha desarrollado algunos trabajos en el tema energético, específicamente biocombustibles; obtención de biodiesel a partir de aceite usado de cocina por transesterificación en dos etapas

con dos tipos de alcoholes (Cifuentes Guerrero, 2010) y la evaluación del desempeño del biocombustible de aceite de higuera para ser utilizado como fuente de energía en calderas (Vargas Adán & Torres Orjuela, 2009), entre otros. También existen trabajos encaminados a la obtención y caracterización de biocombustible como: estudio y caracterización de los parámetros físicos y químicos del aceite de soya como biocombustible bajo la norma NTC 1438 (Espinosa Vanegas & Monroy Gutierrez, 2008) y comparación de un biocombustible a base de aceite de higuera con el diésel como combustible alternativo para motores diésel (Gonzalez Barinas, 2009) pero a la fecha no se registran estudios o ensayos sistemáticos encaminados a evaluar la estabilidad química del biodiesel de palma, hecho que evidencia la importancia del presente trabajo.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la estabilidad química del biodiesel de palma bajo condiciones de almacenamiento.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Correlacionar factores de almacenamiento que implican luz, humedad y temperatura, con propiedades físicas y químicas marcadoras de calidad del biocombustible.
- Estimar condiciones adecuadas de almacenamiento del biocombustible.

## 5 MARCO REFERENCIAL

### 5.1 MARCO HISTÓRICO

El biodiesel se obtiene a partir de grasas o aceites vegetales mediante proceso de transesterificación, desarrollado por los británicos E. Duffy y J. Patrick con el objetivo de obtener glicerina. En 1893 el francés Rudolph Diesel utilizó esta técnica para producir un combustible a base de aceite de cacahuete dando así el primer paso en la historia del biocombustible (López Ramírez, De los santos Reyes, Jiménez Díaz, & Palacios-Silva, 2010). El biodiesel se empleó en motores automotrices durante la segunda guerra mundial debido a la escases de combustibles (eco2site, 2010) sin embargo, fue hasta finales de las décadas de los 70's y 80's que la preocupación por los altos precios del petróleo y la conservación del medio ambiente llevó a la experimentación para obtenerlo de una gran variedad de aceites vegetales (López Ramírez, De los santos Reyes, Jiménez Díaz, & Palacios-Silva, 2010) entre ellos uno de los más populares es el aceite de palma debido a la gran facilidad de producción de cultivo (Fedepalma, 2007).

El desarrollo de biocombustibles a nivel mundial y la preservación del medio ambiente, incentivó en Colombia la fundación de la Federación Nacional de Biocombustibles en el año 2004, organización creada para impulsar el sector y resolver los interrogantes más frecuentes que surgen de esta creciente industria, estableciendo en el año 2008 la ley 939 del 2004, la cual hace posible la producción a nivel industrial de biodiesel en el país (Federacion nacional de biocombustibles, 2011).



### 5.1.1 ANTECEDENTES

El biodiesel es un biocombustible relativamente amigable con el medio ambiente sin embargo, presenta una serie de limitaciones para uso en motores de combustión, siendo su principal problema el periodo de tiempo al que se somete en almacenamiento hasta distribución al consumidor final, ya que durante éste el biodiesel está expuesto a sufrir una degradación oxidativa, debido a la exposición a factores como contacto con el aire, humedad, luz y temperatura, pudiendo afectar a la calidad final del producto (Molina Mayo, 2012).

Mundialmente se han realizado estudios sobre estabilidad química del biodiesel obtenido de aceites como el de girasol, Brassica y reciclado de cocina; estudios que han identificado parámetros marcadores de calidad como índice de peróxido, índice de acidez, índice de yodo, viscosidad e impurezas insolubles, cuya estabilidad oxidativa ha sido sometida a monitoreo en un período de treinta meses (Bouaid, Martinez, & Aracil, 2007).

- En Brasil se han evaluado las propiedades del biodiesel de soya mezclado con cebo durante el almacenamiento a largo plazo, sometido a diferentes temperaturas, donde se determinó índice de yodo, valor ácido, viscosidad cinemática, contenido de agua y estabilidad de oxidación dando como resultado que entre mayor sea el grado de saturación del biocombustible se producirá un aumento en la vida útil del mismo así como una variación considerable de las propiedades físico químicas al someterse a una temperatura promedio de 25° C (Jussara , Raísa , & Donato, 2012).
- En Nigeria en el año 2012 se realizó un estudio enfocado sobre el efecto de almacenamiento en la estabilidad de biocombustible obtenido de diferentes semillas. El monitoreo de acidez, viscosidad cinemática, índice de peróxidos, punto de inflamación y valor calorífico, durante un periodo de

diez meses, reportó que el factor más afectado fue el índice de peróxido, lo cual significó elevar su incidencia en la estabilidad de los biocombustibles, puesto que el almacenamiento se llevó a cabo en contacto con aire (Ndana, Garba, Hassan, & Faruk, 2012).

- En la universidad de Malasia se llevó a cabo la evaluación de la estabilidad de oxidación en almacenamiento para biocombustibles obtenidos a partir de diferentes fuentes y las mezclas con combustible diésel, se estableció que la tasa de oxidación aumenta debido a las inestabilidades de propiedades térmicas y físico químicas del biodiesel (Shahabuddin, Kalam, Masjuk, Bhuiya, & Mofijur, 2012).
- En Atenas, Grecia en el año 2010, se realizaron estudios para evaluar la estabilidad oxidativa de las mezclas de diésel – biodiesel, así como la susceptibilidad a la oxidación o auto oxidación durante el almacenamiento a largo plazo, dando como resultado la alteración de propiedades de calidad del biocombustible (Karavalakis, Stournas, & Karonis, 2010).

A nivel nacional los estudios sobre estabilidad de biodiesel se han enfocado en mezclas con diésel, evaluando el comportamiento químico de ciertos biocombustibles derivados de diferentes aceites; en Medellín en el año 2012, se llevó a cabo un estudio de estabilidad a oxidación y comportamiento de flujo en frío de biodiesel de palma, sacha inchi, jatropha y mezclas de biodiesel de aceite de ricino con el fin de obtener un combustible de mejor rendimiento, para esto se llevaron a cabo ensayos de número de cetano, viscosidad, valor calorífico, flujo en frío y estabilidad oxidativa, estableciéndose que para cada aceite un mayor contenido de ésteres metílicos poliinsaturados disminuye la estabilidad oxidativa (Zuleta, Ernesto; Rios, Luis ; Benjumea, Pedro, 2012)

Igualmente se han realizado estudios de la estabilidad oxidativa del aceite de palma africana a determinado tiempo de almacenamiento, en presencia de materiales metálicos y poliméricos que se presentan en partes automotrices en áreas de combustión, los materiales a los que fue (Zuleta, Ernesto ; Rios, Luis A; Calderón, Jorge, 2012).

## **5.2 MARCO TEÓRICO**

### **5.2.1 CALIDAD DEL BIODIESEL**

Se puede definir como el resultado de controlar ciertas características físicas y químicas del biocombustible, cuando éste se expone a diferentes factores. El garantizar un resultado óptimo de control implica asegurar la calidad de las materias primas, la composición de ácidos grasos provenientes del aceite, materiales, procesos de producción, manejo y almacenamiento (István Barabás & Ioan, 2011).

### **5.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL BIODIESEL**

Los factores más influyentes sobre el deterioro del biodiesel y por ende disminución en calidad son humedad, temperatura por encima de condiciones ambientales, exposición al aire y luz, material de los recipientes de almacenamiento, presencia de cuerpos extraños (considerados como contaminantes) los cuales ejercen un efecto catalítico sobre la oxidación del biocombustible, generando así inestabilidad de tipo químico (Kapilan, Ashok Babu, & Reddy, 2009).

Los factores mencionados tienen influencia individual sobre el biocombustible debido a sus propiedades:

- La temperatura no sólo es un agente catalítico en cualquier reacción química, sino que también altera la densidad del biodiesel generando de esta forma una caída en la calidad del biodiesel (Anguaya Velásquez, 2007).
- La radiación (luz solar), en particular la ultravioleta promueve la formación de radicales libres que representan formación de peróxidos en la etapa inicial de la reacción de auto- oxidación (Vivas Castaño, 2010).
- La disponibilidad de oxígeno afecta de manera directa la oxidación del biocombustible, ya que reacciona con los ácidos grasos presentes en el biodiesel (Anguaya Velásquez, 2007).

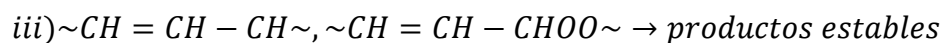
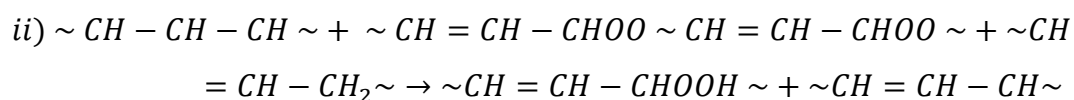
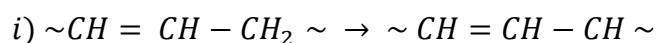
### **5.2.3 ESTABILIDAD QUÍMICA**

Hace referencia a la oxidación durante el almacenamiento y la degradación hidrolítica; capacidad del combustible para resistir cambios químicos durante el almacenamiento a largo plazo, los cuales generalmente se deben al contacto con el oxígeno del aire (István Barabás & Ioan, 2011).

### 5.2.3.1 AUTO OXIDACIÓN

Proceso complejo que consta de tres etapas: iniciación, propagación y terminación

**Figura 1:** Mecanismo de auto oxidación: i) iniciación, ii) propagación y iii) terminación.



En la etapa de iniciación un radical libre ataca los ácidos grasos extrayendo un hidrógeno alilo y generando un radical alilo, generalmente producido por la descomposición de un hidroperóxido presente en los compuestos grasos del biodiesel (Zuleta, Ernesto ; Rios, Luis A; Calderón, Jorge, 2012).

La etapa de propagación consta de dos pasos: en el primero, el radical alilo reacciona con el oxígeno produciendo radicales peróxidos, en el segundo el radical peróxido abstrae otro hidrógeno alilo produciendo un peróxido alilo y generando un nuevo radical alilo para que reaccione de nuevo con el oxígeno formando una reacción en cadena.

En la etapa de terminación se presentan reacciones de recombinación entre radicales, para formar monómeros y polímeros, entre los productos de estas reacciones se presentan alcoholes, cetonas, alcanos y aldehídos (Zuleta, Rios, & Calderón, 2012).

### **5.2.3.2 FOTO OXIDACIÓN**

La luz promueve las reacciones de oxidación debido a la presencia de radicales libres, para que este proceso se lleve a cabo es necesario la presencia de agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno y el ozono entre otros (Mejia, Garces, & Santamaria, 2010).

## **5.3 MARCO CONCEPTUAL**

### **5.3.1 BIOCOMBUSTIBLE**

Combustible que se obtiene a partir materia orgánica, ya sea de origen vegetal o animal y su finalidad es liberar energía mediante una reacción de combustión, entre los más convencionales se encuentran los alcoholes, el biogás y el biodiesel, todos obtenidos a partir de fuentes orgánicas (PETROBRAS & Ministério das Minas e Energia do Brasil, 2007).

### **5.3.2 BIODIESEL DE PALMA**

Mezcla de alquilésteres de ácidos grasos de cadena larga saturados e insaturados obtenidos a partir del aceite de palma (Rakesh, Meeta, Sinharay, & Malhotra, 2007), donde el glicerol del triglicérido es sustituido por otro alcohol de bajo peso molecular (etanol o metanol) y con la ayuda de un catalizador (Natarahan, 2012).

### **5.3.3 ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN**

Degradación potencial de la vida útil del biocombustible durante su almacenamiento, siendo su mayor causa de oxidación el contacto con el aire (Avellaneda Vargas F. , 2010).

### **5.3.4 ÍNDICE DE ACIDEZ**

Medida por la cual se busca neutralizar los ácidos grasos libres a través de la determinación de la cantidad de hidróxido de potasio, el cual depende de la calidad de la materia prima en la producción del biocombustible(Santillan, Juárez , & Flores, 2010)

### **5.3.5 CONTENIDO DE AGUA**

Característica fundamental en calidad de combustibles, pues señala la cantidad de agua capturada del ambiente o tanques de almacenamiento, y que contribuye a la contaminación microbiológica (Galeano & Guapacha, 2011).

### **5.3.6 ÍNDICE DE PERÓXIDOS**

Cuantifica el grado de oxidación de un aceite, teniendo en cuenta las condiciones de almacenamiento y los diferentes factores que aceleran la oxidación (temperatura y luz). En este método se determinan mili-equivalentes de oxígeno activo contenidos en un kilogramo de grasa (Anguaya Velásquez, 2007).

### **5.3.7 ÍNDICE DE YODO**

Determina la magnitud de insaturación en un aceite graso o su respectivo biodiesel medido en g de yodo/100 g de una muestra (Siddharth & Sharma, 2010).

### **5.3.8 VISCOSIDAD CINEMÁTICA**

Medida de la fricción interna entre moléculas, o de la resistencia a fluir de los líquidos, la viscosidad cinemática hace referencia a la densidad del fluido (Nwadike, Yahaya, O'Donnell, Demshemino, & Okoro, 2013).

### **5.3.9 CONTAMINACIÓN TOTAL**

Medida del material insoluble después de su filtración, indica presencia de materiales saponificados y sedimentos que pueden alterar los procesos de combustión (Avellaneda Vargas F. , 2010)

### **5.3.10 ALMACENAMIENTO A LARGO PLAZO**

Hace referencia a periodos de tiempo mayores a seis meses después de ser producido o recibido por el usuario (ICONTEC, 2007).

### **5.3.11 CORROSIÓN EN LÁMINA DE COBRE**

Tendencia del biocombustible a generar compuestos corrosivos o ácidos que facilitan la corrosión en los tanques de almacenamiento y partes del motor que



están fabricados a base de materiales de cobre o aleaciones de cobre (Vivas Castaño, 2010).

## **5.4 MARCO LEGAL**

### **5.4.1 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL**

- ATSM D6751 especificación estándar para biodiesel B100 y para mezclas con combustibles: establece especificaciones para controlar la calidad del biodiesel B100 además de su uso en las mezclas con petrodiesel de acuerdo con su contenido de azufre.
- La ASTM D6751-08, especificación para existencias de mezclas de combustible biodiesel (B100) para combustibles de destilación intermedia, la cual se modificó para incluir un requisito que controle las combinaciones secundarias y que brinda una información más precisa sobre cómo funcionará el combustible cuando el ambiente este frío.
- EN 14214 combustibles de automoción y ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME): especifica los requisitos y métodos de ensayo para los ésteres metílicos y ácidos grasos, la comercialización y su uso como combustible en automotores de característica diésel.

## 5.4.2 NORMATIVIDAD NACIONAL

Debido a factores tales como atractivo económico, preocupación por el medio ambiente, desarrollo sostenible y dinámica de precios internacionales del petróleo (Herrera, Leyva, Ortiz, Cardenas, & Garzon, 2009), en Colombia se marcó la tendencia sobre la nueva era mundial de los combustibles de origen vegetal con la implementación de la ley 693 del año 2001.

- **Resolución N° 1289 de 2005**

Establece los requisitos de calidad técnica y ambiental de los biocombustibles para uso en motores diésel, al igual que la definición de sus mezclas con el diésel.

- **Norma técnica NTC 5444 del 2007**

Señala las especificaciones del biocombustible para uso en motores diésel, abarca además los alquilésteres de ácidos grasos para uso combustible o como componente de mezclas con combustibles diésel, cuyas características están definidas en la NTC 1438.

- **Decreto 4892 del 23 de diciembre del 2012**

Se dictan disposiciones aplicables al uso de alcoholes carburantes y biocombustibles para vehículos automotores y que teniendo en cuenta los efectos en materia de abastecimiento energético, sostenibilidad ambiental, desarrollo y empleo rural es de interés social público y de conveniencia nacional, aplicar medidas tendientes a promover el uso de alcoholes carburantes y biocombustibles en el país.

## 6 DISEÑO METODOLÓGICO

### 6.1 FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD QUÍMICA DEL BIODIESEL

Se almacenaron muestras de biodiesel de palma durante un periodo de tiempo de cuatro meses dividido en siete muestreos realizados en intervalos de tiempo de quince días clasificados como T0 (tiempo inicial) T1, T2, T3, T4, T5, T6 y T7 respectivamente, modificando condiciones experimentales de temperatura, humedad y luz, para evaluar parámetros físicos y químicos relacionados en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del biocombustible

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODOS DE ENSAYO
Densidad a 40°C	Kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052 ISO 3675
Número ácido	mg de KOH/g	ASTM D664 EN 1404
Viscosidad (cinemática 40 °C)	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445 ISO 3104
Lámina de Cobre	1,2,3,4 a,b,c,d,e	STM D130

Adicionalmente se determinó el poder calorífico en una bomba calorimétrica modelo PAR 1341, previa calibración de acuerdo con el manual de instrucciones del equipo. Para el análisis FTIR, se empleó un espectrofotómetro SHIMADZU modelo PRESTIGE-21 siguiendo procedimiento establecido para muestras líquidas. Se realizaron pruebas en cuatro puntos de tiempo diferentes que se seleccionaron de manera alternada cada treinta (30) días, con el propósito de

brindar un mayor tiempo de contacto de la muestra con los factores de influencia (incidencia de luz, humedad y temperatura) y evidenciar cambios significativos a lo largo del tiempo de almacenamiento.

## 6.2 ESTIMACIÓN DE CONDICIONES ADECUADAS DE ALMACENAMIENTO DEL BIOCOMBUSTIBLE

Se aplicó un diseño experimental tipo factorial  $2^3$ , realizando ensayos por duplicado ver tabla 2, cuyas muestras se sometieron a tres factores de influencia: temperatura (A), luz (B) y humedad (C). Igualmente se contemplaron los siguientes niveles: temperatura a 20 y 30°C, presencia o ausencia de luz y humedad. La influencia de dichas variables sobre la calidad del biodiesel se determinó a través de parámetros como viscosidad, densidad, índice de acidez y lámina de cobre.

**Tabla 2.** Metodología de muestreo y condiciones ambientales

<b>Experimento</b>	<b>Temperatura (°C) (A)</b>	<b>Luz (B)</b>	<b>Agua (%) (C)</b>
1a, 1b	20	No	No
2a, 2b	30	No	No
3a, 3b	20	Si	No
4a, 4b	30	Si	No
5a, 5b	20	No	Si
6a, 6b	30	No	Si
7a, 7b	20	Si	Si
8a, 8b	30	Si	Si

Los datos obtenidos en el estudio de estabilidad se analizaron a través de un análisis de varianza ANOVA con un nivel de significancia del 95% con el fin de establecer si hay diferencias estadísticamente significativas.

## 7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización física y química inicial del biodiesel se aprecia en la tabla 3, en ella se puede observar que los parámetros evaluados se encuentran dentro del rango establecido por la respectiva norma, lo cual indica que el biocombustible cumple con los requisitos de calidad para ser empleado como punto inicial (tiempo 0) y comparativo en el respectivo estudio de estabilidad.

**Tabla 3.** Parámetros físicos y químicos iniciales biodiesel

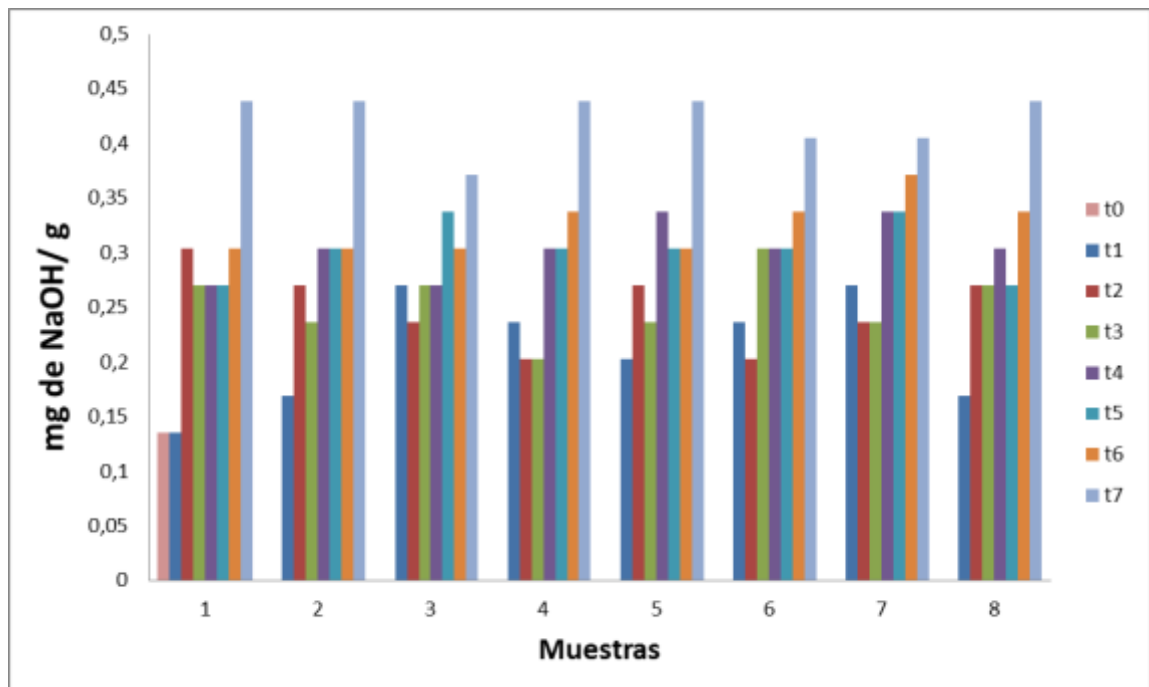
<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR (LABORATORIO)</b>	<b>MÉTODO UTILIZADO</b>	<b>VALOR NORMA (FEDEPALMA)</b>
<b>Viscosidad cinemática (mm<sup>2</sup>/s)</b>	2,0748	ASTM D445	1,9 - 6,0
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	877	ASTM/NTC	860 - 900
<b>Lámina de Cobre</b>	1b	ASTM D130	<3
<b>Índice de acidez (mg NaOH/g)</b>	0,1348	NTC 218	0,5 máximo

## 7.1 PARÁMETROS DE CALIDAD CON RESPECTO A CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO

La determinación periódica de parámetros físicos y químicos permite establecer la influencia de los factores de almacenamiento contemplados sobre la estabilidad química del biodiesel de palma.

### 7.1.1 ÍNDICE DE ACIDEZ

El comportamiento del índice de acidez a lo largo del tiempo de almacenamiento se puede observar en la gráfica 1, en donde se aprecia de forma general un incremento con respecto al valor obtenido en el tiempo cero (T0).



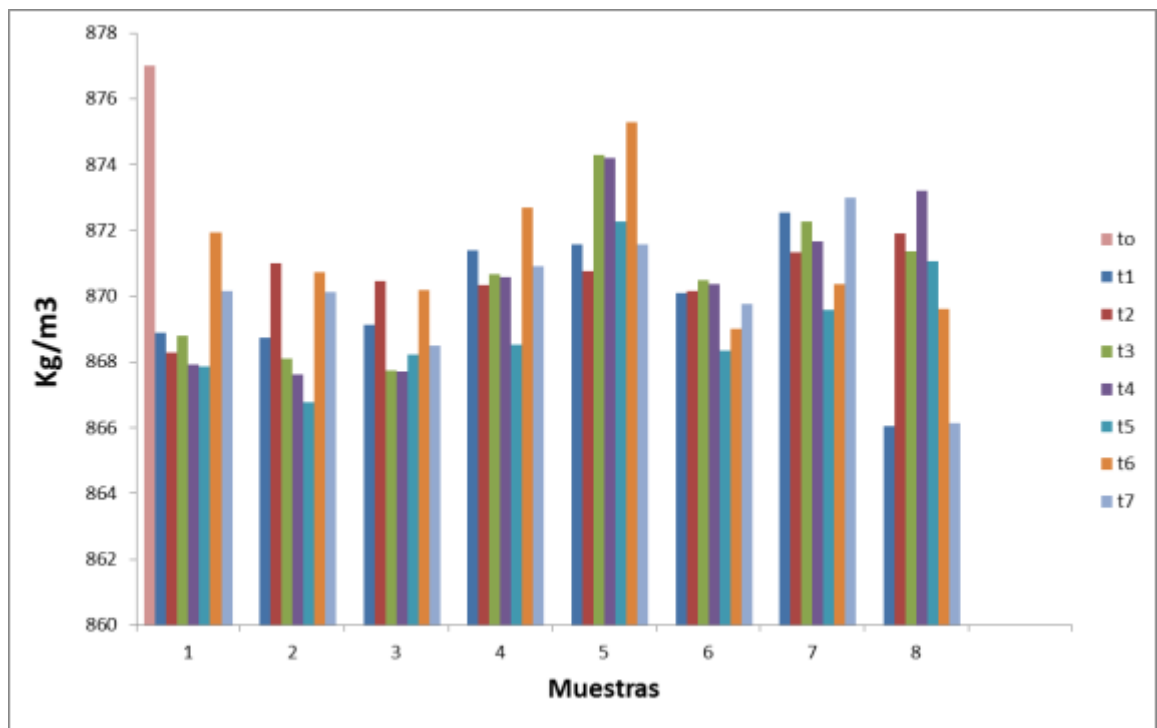
**Gráfica 1.** Comportamiento índice de acidez a través de tiempo de muestreo

Cabe resaltar que la muestra 3 presenta un comportamiento ajeno a la tendencia antes mencionada y, que en principio se podría atribuir a las condiciones experimentales de estudio, en especial a la presencia de luz, la cual favorecería el inicio de oxidación de compuestos tales como ácidos libres (Martinez, 2012).

El incremento en el índice de acidez representa un problema potencial para la estabilidad de los materiales metálicos, puesto que éstos son más susceptibles a la corrosión y por tanto a la pérdida de propiedades mecánicas debido a los bajos valores de pH (Zuleta, Baenall, Riosl, & CalderónII, 2012), los efectos corrosivos se pueden ver reflejados en el incremento en los valores de partículas tóxicas liberadas en la atmosfera mediante el sistema de escape de los automotores y un aumento en óxidos de nitrógeno debido a los efectos en el tiempo de inyección de combustible (Acevedo & Hernandez, 2010).

### 7.1.2 DENSIDAD

En la gráfica 2 se presenta el comportamiento de la densidad a través del tiempo de estudio; se aprecia como tendencia general una disminución leve con respecto al valor obtenido en tiempo cero, hecho que se podría atribuir a la temperatura de evaluación, ya que las muestras se almacenaron a temperaturas superiores a la de comparación es decir, a 20 y 30 °C.



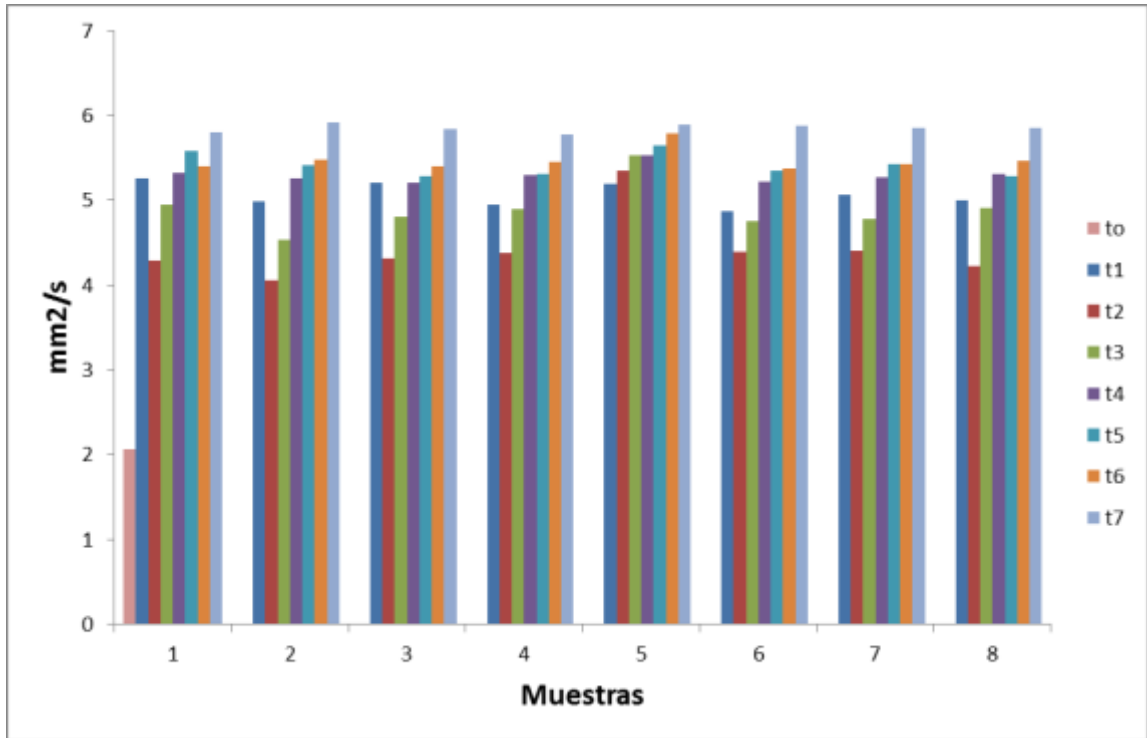
**Grafica 2.** Comportamiento densidad a través de tiempo de muestreo



Sin embargo se debe resaltar que la muestra 5, reportó un incremento en el valor de esta propiedad, como consecuencia probablemente de las variables experimentales a las cuales fue expuesta: baja temperatura, ausencia de luz y presencia de humedad. Al disminuir la temperatura, las moléculas que componen el biocombustible eventualmente pueden comenzar a formar cristales, si dicha temperatura continua disminuyendo tales cristales crecen lo suficiente como para llegar a crear aglomerados sedimentos (Castro, Coello, & Castillo, 2007), causando deterioro en la calidad del biocombustible (Benjumea, Pedro; Agudelo, John; Ríos, Luis, 2007), obstruyendo los sistemas de inyección en los motores automotrices, lo cual se significa aumento en las emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

### **7.1.3 VISCOSIDAD**

El comportamiento de la viscosidad cinemática durante el tiempo de muestreo se observa en la gráfica 3, cuya tendencia general presenta un aumento considerable con respecto al valor de referencia, hecho que se podría relacionar con el alto contenido de ácidos grasos libres propios del biodiesel debido a la naturaleza de su composición (Alvarez, Molina, & Benjumea, 2006).



**Grafica 3.** Comportamiento Viscosidad cinemática a través de tiempo de muestreo

Al igual que en el parámetro anterior, la muestra 5 registra un comportamiento un poco diferente con respecto a las otras muestras, pues se aprecia un mayor índice en el aumento de la viscosidad, debido quizá a la presencia de humedad, la cual puede conducir a la formación de ácidos grasos a partir de esteres o la ruptura enlaces dobles, saturando el biocombustible y produciendo una disminución en el flujo capilar (Knothe, 2010).

El aumentar la viscosidad en un biocombustible se traduce en un problema potencial, ya que se afecta la atomización del combustible, causando una mala combustión en el motor y por ende depósitos en el mismo (Avellaneda Vargas, 2010), que a nivel ambiental representa un incremento en las emisiones de material particulado.

#### 7.1.4 CORROSIÓN LÁMINA DE COBRE

Ensayo de gran importancia en cuanto a la calidad del biodiesel se refiere, debido a que determina la probabilidad que el combustible pueda causar corrosión en las partes del motor construidas en cobre, bronce o zinc.

**Tabla 4.** Resultados de muestreo de la corrosión a Lámina de Cobre

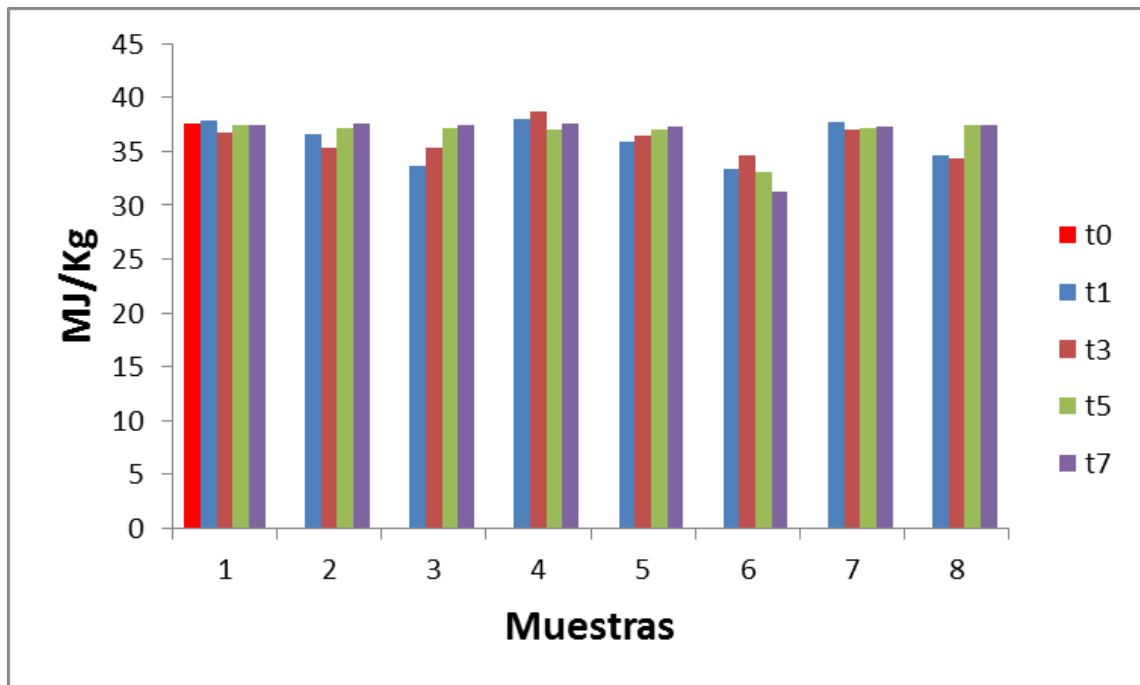
Muestra	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1A – 1B	3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
2A – 2B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
3A – 3B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
4A – 4B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
5A – 5B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
6A – 6B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
7A – 7B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
8A – 8B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a

La tabla 4 presenta los resultados obtenidos para las muestras evaluadas bajo el tiempo de almacenamiento, se puede observar que todas las muestras registran un valor en o muy cercano al clasificado como 3a (dark tarnish) lo cual significa un nivel de desgaste bajo (ver anexo 4 y 5), por lo tanto el biodiesel de palma representará corrosión mínima y, según el indicador 3a este biocombustible no contiene compuestos corrosivos o ácidos que puedan ocasionar un descenso significativo en su calidad y posterior desempeño (Vivas Castaño, 2010).

### 7.1.5 PODER CALORÍFICO

Una característica muy importante en los biocombustibles es el poder de combustión, ya que se relaciona con la calidad de calor transferido al motor durante la combustión e indica la cantidad de energía en el biodiesel (Oliveira & Da Silva, 2013).

En la gráfica 4 se puede observar el comportamiento del poder calorífico durante el periodo de almacenamiento; como tendencia general se aprecian ligeras modificaciones con respecto al valor inicial t0 (ver anexo 6) sin embargo, se debe resaltar que la muestra 6 registra un descenso mayor en los niveles de esta propiedad, comportamiento atribuido a que la presencia de humedad disminuye el poder calorífico de los combustibles, puesto que parte del calor desprendido durante la combustión tendrá que utilizarse para evaporar el agua proveniente de la humedad del mismo (Garces & Martines, 2007).



**Grafica 4.** Comportamiento poder calorífico a través del tiempo de muestreo

**Tabla 5.** Comparación poder calorífico biodiesel experimental, biodiesel teórico y diésel teórico

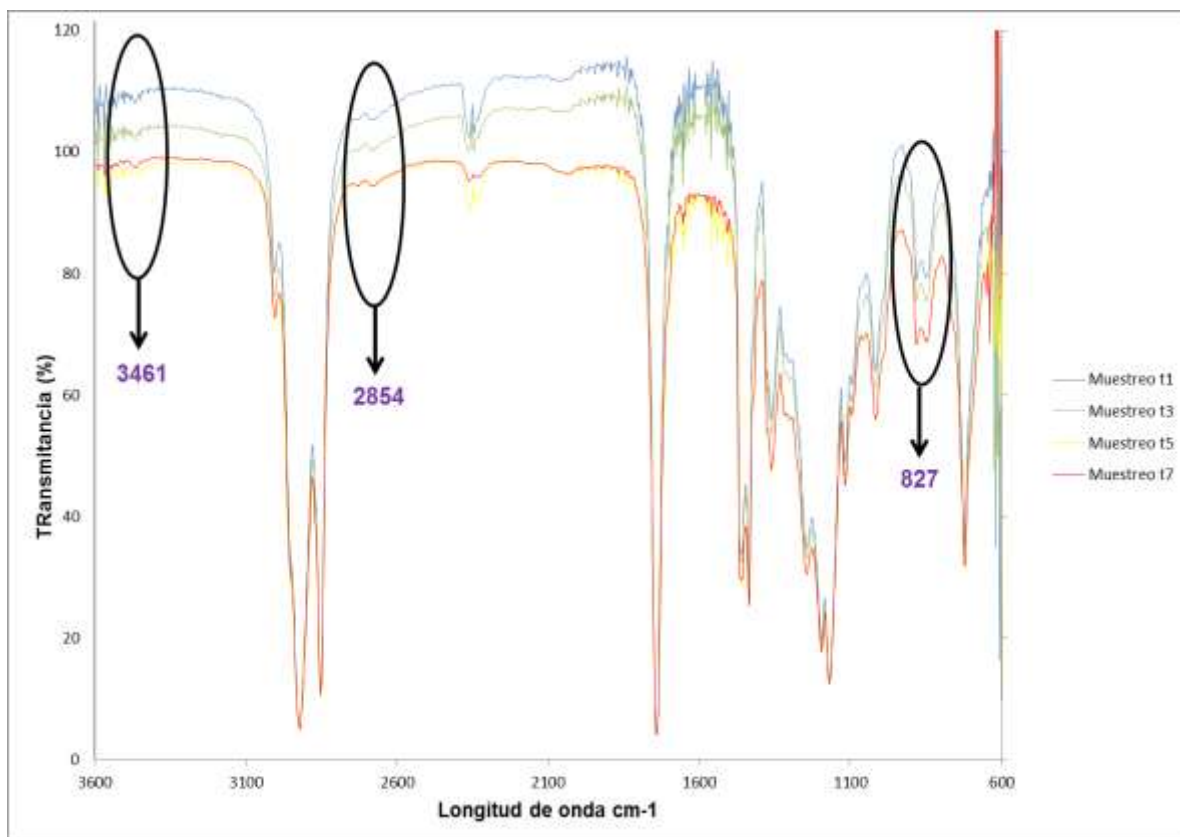
<b>Combustible</b>	<b>Poder calorífico (MJ/Kg)</b>
Biodiesel Teórico	37,25
Biodiesel Experimental	37,20
Diésel Teórico	43,01

(Benavides , Alirio; Benjumea, Pedro; Pashova, Veselina, 2007)

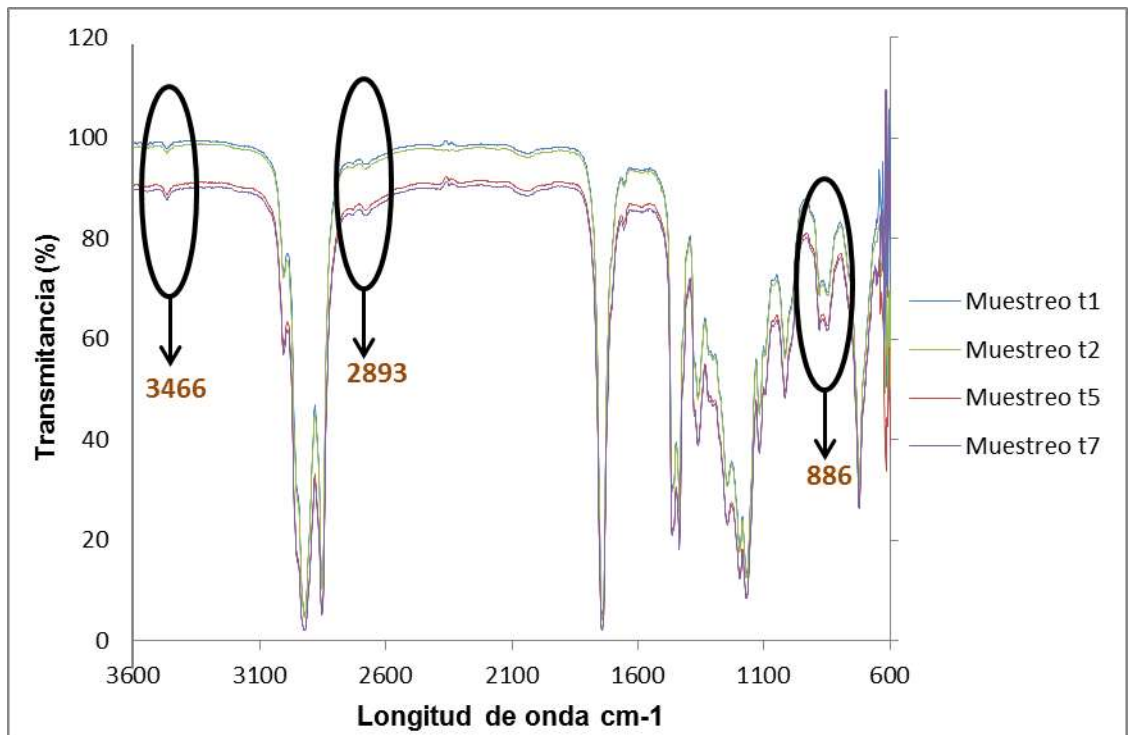
Aunque el poder calorífico del biodiesel es menor en aproximadamente un 9% con respecto a un combustible convencional (Oliveira & Da Silva, 2013) tabla 5, el que el biodiesel sea menos contaminante en términos de emisiones de gases nocivos y material particulado, lo convierte en un energético de mayor demanda.

#### **7.1.6 PRESENCIA DE PERÓXIDOS**

La concentración de peróxidos en biocombustibles es de gran importancia, pues permite estimar estabilidad en términos de calidad, ya que éste indica el grado de oxidación inicial promovido por factores como temperatura, humedad, luz y presencia de oxígeno (Zuleta, Rios, & Calderón, 2012). En las gráficas 5 – 8 se observan los respectivos espectros infrarrojos FTIR, de las muestras de biodiesel bajo estudio, en ellas se puede apreciar la presencia del grupo funcional asociado a peróxido, a través de ciertas bandas de absorción ubicadas entre 3460 - 3470  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a la longitud de onda del hidroperóxido (R-O-OH) (Zahir, Saeed, Hameed, & Yousuf, 2014), además se encuentran peróxidos entre 3272 – 2849  $\text{cm}^{-1}$  (Paul, 2006) y por último entre 900 – 700  $\text{cm}^{-1}$  se evidencia peróxidos (R-O-O-R) (Leiva, Romero, Gorge, Gomez, & Castro, 2009).



**Grafica 5.** Espectros FTIR determinación de peróxidos en la muestra 6a



**Grafica 6.** Espectro FTIR determinación de peróxidos en la muestra 8a

En los diferentes espectros se aprecia modificación en la intensidad de banda de aquellas identificadas como representativas para la presencia de peróxidos. Cabe resaltar que las muestras 6a y 8a, las cuales debido a una mayor cantidad de oxígeno relacionada con las condiciones experimentales de humedad y temperatura reportaron mayor concentración de grupos funcionales asociados a la formación de peróxidos en el biodiesel durante el periodo de tiempo de almacenamiento (Zahir, Saeed, Hameed, & Yousuf, 2014).

## 8 ANALISIS ESTADÍSTICO

### 8.1 ESTIMACIÓN DE CONDICIONES ADECUADAS DE ALMACENAMIENTO DEL BIOCOMBUSTIBLE

A través del software SPSS, se realizó el análisis estadístico de los siguientes parámetros físicos y químicos: viscosidad, densidad, humedad, contaminación total e índice de acidez (ver tabla 1); con el propósito de estimar las condiciones de almacenamiento más adecuadas para el biocombustible, bajo la influencia de variables de estudio tales como presencia de luz, humedad y variación de temperatura.

Una vez se llevó a cabo el ANOVA con un nivel de significancia del 5%, se encontró que el efecto del almacenamiento fue significativo en todos los ensayos realizados (ver tabla 6), además el análisis de varianza se puede corroborar con los valores de probabilidad continua (P y F) registrados en la tabla de valores P y F para los experimentos 1 a 8 del análisis de varianza con significativa en el nivel 0.05 (ver anexo 10).

**Tabla 6.** Análisis estadístico ANOVA

ANOVA					
Valor	Suma de cuadrados	GL	Medida cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,125	7	0,018	20,909	0,000
Dentro de grupos	0,007	8	0,001	–	–
Total	0,132	15	–	–	–



Teniendo en cuenta la prueba de Tukey se puede afirmar que en todos los experimentos hay diferencias estadísticamente significativas entre el tiempo cero y los primeros 15 días de almacenamiento.

Al comparar el comportamiento de las propiedades evaluadas (ver anexos 7, 8 y 9) a lo largo del almacenamiento en todos los experimentos, se observó que la menor variabilidad en cada caso corresponden a los datos que se encuentran registrados en tabla 7:

**Tabla 7.** Propiedades evaluadas en el análisis estadístico

Parámetro	Muestra de menor variabilidad	Condiciones adecuadas de almacenamiento		
		Temperatura	Luz	Agua
<b>Viscosidad</b>	Muestra 4	30	con	sin
<b>Densidad</b>	Muestra 2	30	sin	sin
<b>Acidez</b>	Muestra 2	30	sin	sin
<b>Humedad</b>	Muestra 2	30	sin	sin
<b>Contaminación total</b>	Muestra 2	30	sin	sin

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede seleccionar como condiciones apropiadas de almacenamiento para el biodiesel de palma, aquellas que se contemplan en la muestra dos, dado que aunque hay variación en cada propiedad evaluada respecto al tiempo cero, los cambios son menores con respecto a los demás ensayos.

## 9 CONCLUSIONES

- Temperaturas bajas (20 °C) modifican las propiedades físicas del biodiesel de palma, debido a que el biocombustible tiende a solidificar y generar sedimentos incrementando densidad y disminuyendo a su vez la fluidez.
- La presencia de humedad en las muestras de biodiesel de palma altera las propiedades químicas, pues facilita procesos autoxidativos en el biocombustible, hecho que se evidencia en el incremento del índice de acidez y disminución del poder calorífico de las respectivas muestras.
- La presencia de humedad y luz resultan ser factores importantes en el incremento de la concentración de peróxidos en el biocombustible, lo cual se refleja a través de las intensidades de bandas en los espectros FTIR de las muestras analizadas.
- Las condiciones de almacenamiento más adecuadas para preservar la estabilidad química del biodiesel de palma por mayor tiempo, implican temperatura de 30°C, ausencia de luz y ausencia de humedad, condiciones que se representan en el experimento # 2.

## 10 RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de estabilidad de biodiesel en mezcla con diésel, debido a que ésta es el principal producto que se comercializa actualmente en el país.
- Evaluar la influencia del material de los recipientes de almacenamiento en la estabilidad del biodiesel de palma.
- Desarrollar estudios similares, donde se contemplen condiciones de almacenamiento propias de los diferentes pisos térmicos del país.
- Realizar estudios de estabilidad en términos de composición del biodiesel a través de análisis cromatográfico FAMES (esteres metílicos de ácidos grasos).

## 11 BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, J., & Hernandez, J. (2010). *El impacto ambiental del biodiesel en Colombia*. Colombia.
- Acevedo, J., & Hernandez, J. (2012). Impacto ambiental del Biodiesel en Colombia. *Revista Universidad de Santander*.
- Aliseda Montero, R. (2007). *Estudio de la Transesterificación de aceite vegetal con metanol*. Madrid- España: Universidad Rey Juan Carlos.
- Alvarez, A., Molina, A., & Benjumea, P. (2006). Predicción del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional. *Energetica, universidad nacional de Colombia*.
- Anguaya Velásquez, C. A. (2007). *Estudio de estabilidad en almacén del biodiesel obtenido de aceite de soya (Glycine max), palma africana (Elaeis guineensis), maíz (Zea mays), higuera (Ricinus communis) y piñón (Jatropha curcas)*. Honduras: Zamorano.
- Augusto, J., & Cuéllar, M. (2007). Posibilidades del biodiesel de palma y sus mezclas con diesel en Colombia. *PALMAS*, 28, 65 - 71.
- Avellaneda Vargas, F. (16 de marzo de 2010). producción y caracterización de biodiesel de palma y aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal . *tesis doctoral* . Tarragona , España: Universidad Rovira i Virgili.
- Balat, M., & Balat, H. (2008). A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel. *Energy conversion and management*, 49, 2728-2730.

- Benavides , Alirio; Benjumea, Pedro; Pashova, Veselina. (2007). El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel. *DYNA*.
- Benavides, A., Benjumea , P., & Pashova, V. (2007). El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motres diesel. *DYNA*.
- Benavides, A., Benjumea, P., & Pashova, V. (2007). El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel. *DYNA*.
- Benjumea, P., Chaves, G., & Vargas, C. (2006). Efecto de la temperatura sobre la densidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional. *Energetica*.
- Benjumea, Pedro; Agudelo, John; Ríos, Luis. (2007). Propiedades de flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 42, 94-107.
- Bouaid, A., Martinez, M., & Aracil, J. (2007). Long storage stability of biodiesel from vegetable and used frying oils. *FUEL*, 86, 2596–2602.
- Castro, P., Coello, J., & Castillo, L. (2007). *Opciones para la producción uso de biodiesel en el Peru*. Peru: Ediciones Soluciones practicas.
- Cifuentes Guerrero, M. F. (2010). *Obtención de biodiesel a partir de aceite usado de cocina por transesterificación en dos etapas, con dos tipos de alcoholes*. Bogotá: Universidad Libre.
- Cruz, B. (2011). *Evaluación de estabilidad en almacenamiento en dos ambientes del biodiesel de aceite de palma africana (Elaeis guineensis) y dos variedades de piñón (Jatropha curcas)*. Zamorano, Honduras.
- eco2site. (2010). *www.eco2site.com*. Obtenido de *www.eco2site.com*: <http://www.adiveter.com/ftp/articles/A2070907.pdf>

- Erum , Z., Rehana , S., Mehwish , A., & Anjum , Y. (2014). Study of physicochemical properties of edible oil and evaluation of frying oil quality by Fourier Transform-Infrared (FT-IR) Spectroscopy. *Arabian Journal of Chemistry* .
- Espinosa Vanegas, O., & Monroy Gutierrez, J. C. (2008). *estudio y caracterización de los parámetros físicos y químicos del aceite de soya como biocombustible bajo la norma NTC 1438*. Bogotá: Universidad Libre .
- Fedepalma. (2007). 45 años de institucionalidad gremial del sector palmero colombiano. *Palmas*, 28, 5-10.
- Federacion nacional de biocombustibles. (2011). Mitos y realidades de los biocombustibles en Colombia. *Federacion nacional de biocombustibles de Colombia*, 1-4.
- Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (2013). *www.fedebiocombustibles.com*. Obtenido de <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/nota-web-id-1413.htm>
- Focke, W., Nshoane, K., derWesthuizen, I. v., Lofté, g., Reddy, j., & luyt, A. (2011). The effect of synthetic antioxidants on the oxidative stability of biodiesel. *Fuel*, 94, 227–233.
- Galeano, C., & Guapacha, M. (2011). *Aprovechamiento y caracterizacion de los residuos grasos del pollo para la produccion de un biocombustible (biodiesel)*. Universidad tecnologica de pereira .
- Garces, R., & Martines, S. (2007). *Estudio del poder calorífico del bagazo de caña de azúcar en la Industria Azucarera de la Zona de Risaralda*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Gonzalez Barinas, J. (2009). *Comparación de un biocombustible a base de aceite de higuera con el diesel como combustible alternativo para motores diesel*. Bogotá: Universidad Libre.

- Herrera, A. (2007). *Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiesel)*. Pereira: Universidad tecnológica de Pereira.
- Herrera, B., Leyva, J., Ortiz, V., Cardenas, J., & Garzon, E. (2009). *Biocombustibles en Colombia*. Colombia: Impresión, dígitos y diseño.
- ICONTEC. (2007). *Norma Técnica Colombiana biodiesel para uso en motores diesel 5444*. Colombia: ICONTEC.
- Isioma, N., Muhammad, Y., Sylvester, O., Innocent, D., & Linus, O. (2013). Cold Flow Properties and Kinematic Viscosity of Biodiesel. *Universal Journal of Chemistry*.
- István Barabás, B., & Ioan, A. T. (2011). *Biodiesel- Quality, Emissions and By-Products*. Romania: Technical University of Cluj-Napoca Romania.
- Jussara, G., Raísa, G., & Donato, A. (2012). Properties of Soybean Biodiesel Blended with Palm or Tallow during Long Term Storage Under Different Conditions. *International Review of Chemical Engineering*, 4(4), 417-422.
- Kapilan, N., Ashok Babu, T., & Reddy, R. (2009). Technical Aspects of Biodiesel and its Oxidation Stability. *International Journal of ChemTech Research*, 1(2), 278-282.
- Karavalakis, G., Stournas, S., & Karonis, D. (2010). Evaluation of the oxidation stability of diesel/biodiesel blends. *Fuel*, 89, 2483–2489.
- Knote, G. (2007). Some aspects of biodiesel oxidative stability. *Fuel Processing Technology*, 88, 669–677.
- Knothe, G. (2010). Calidad del combustible biodiésel y la norma astm. *Palmas*.
- Legaz Berbel, R. (2010). *Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

- Leiva, L., Romero, G., Gorge, N., Gomez, M., & Castro, E. (2009). analisis de espectroscopia UV e IR del 1, 2, 3, 4 - Tetroxano. Un estudio teorico y experimental. *Universidad Argentina*.
- Lin, C.-Y., & Chiu, C.-C. (2010). Burning characteristics of palm-oil biodiesel under long-term storage conditions. *Energy Conversion and Management*, 51, 1464–1467.
- López Ramírez, N. E., De los santos Reyes, I., Jiménez Díaz, A. d., & Palacios-Silva, R. (2010). *unicach.edu.mx*. Obtenido de unicach.edu.mx: [http://www.unicach.edu.mx/\\_ambiental/descargar/Gaceta4/Biodiesel.pdf](http://www.unicach.edu.mx/_ambiental/descargar/Gaceta4/Biodiesel.pdf)
- Machuca , F., Mellizo, J., & Hollos, J. (2010). Optimizacion de condiciones de operación en la transesterificacion de aceites de higuera y palma con etanol e hidróxido de Sodio. *BISTUA: revista de facultad de ciencias basicas*.
- Martinez, S. (2012). Determinacion del indice de acidez en aceites y grasas comestibles.
- Mejia, E., Garces, L., & Santamaria, J. (2010). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista de investigacion la Salle*.
- Molina Mayo, C. (2012). *Estudio de la composición y estabilidad de biodiesel obtenido a partir de aceites vegetales limpios y procedentes de aceites de fritura*. España: Universidad de la Laguna.
- Natarahan, E. (2012). Stability Studies of Biodiesel. *International Journal of Energy Science*, 2, 152-155.
- Ndana, M., Garba, B., Hassan, L., & Faruk, U. (2012). Effect of Storage on Stability of Biodiesel Produced from selected Seed Oils. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 13(1), 10-18.



- Nwadike, I., Yahaya, M., O'Donnell, S., Demshemino, I., & Okoro, L. (2013). Cold Flow Properties and Kinematic Viscosity of Biodiesel. *Universal Journal of Chemistry*, 1(4), 135-141.
- Oliveira , L., & Da Silva, M. (2013). Comparative study of calorific value of rapeseed, soybean, jatropha curcas and crambe biodiesel. *Department of Chemical Engineering EEL-USP, University of Sao Paulo*.
- Pattamaprom, C., Pakdee, W., & Ngamjaroen, S. (2012). Storage degradation of palm-derived biodiesels: Its effects on chemical properties and engine performance. *Renewable Energy*, 37, 412-418.
- Paul, G. (2006). The infrared spectrum of hidrogyn peroxide re-edition . *Journal of chemical physics*.
- Peña Fiel, S. (2011). *Acidos grasos: Generalidades*. Ecuador: Universidad tecnica del norte.
- Petrobras, & Ministério das Minas e Energia do Brasil, .. (2007). *Biocombustíveis 50 perguntas e respostas sobre este novo mercado*. Brasil: Setprint Gráfica e Editora.
- Quezada , J. (2007). *Evaluación de la energía de combustión y otros parámetros físico-químicos del biodiesel obtenido a partir de cinco aceites vegetales*. Honduras.
- Quiroz, B. A. (2011). Evaluación de estabilidad en almacenamiento en dos ambientes del biodiesel de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y dos variedades de piñón (*Jatropha curcas*). Zamorano, Honduras.
- Rakesh, S., Meeta, S., Sinharay, S., & Malhotra, R. (2007). Jatropha–Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. *FUEL*, 86.
- Rincon, S. M., & Martinez, D. M. (2009). Analisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *PALMAS*, 30(2), 11-24.

- Rodríguez, M., Sierra, M., & Cantor, L. (2010). Uso potencial de las mezclas de biodiesel de *Jatropha* y de palma en Colombia. *Studiositas*, 5, 75-87.
- Santillan, R., Juárez , B., & Flores, H. (2010). Evaluación de la calidad oxidativa de tres aceites comerciales en condiciones de almacenamiento acelerado. Guanajuato, Mexico.
- Shahabuddin, M., Kalam, M., Masjuk, H., Bhuiya, M., & Mofijur, M. (2012). An experimental investigation into biodiesel stability by means of oxidation and property determination. *Energy*, 1-7.
- Siddharth , J., & Sharma, M. (2010). Stability of biodiesel and its blends: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 667–678.
- Tang, H., Wang, A., & Salley, S. (2008). The Effect of Natural and Synthetic Antioxidants on the Oxidative. *Am Oil Chem Soc*, 85, 373–382.
- Vargas Adán, J. C., & Torres Orjuela, A. F. (2009). *Evaluación del desempeño del biocombustible de aceite de higuera para ser utilizado como fuente de energía en calderas*. Bogotá: Universidad Libre.
- Vivas Castaño, A. M. (2010). *Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino*. Colombia: universidad tecnológica de pereira.
- Zahir, E., Saeed, R., Hameed, M., & Yousuf, A. (2014). Study of physicochemical properties of edible oil and evaluation of frying oil quality by Fourier Transform-Infrared (FT-IR) Spectroscopy. *Arabian Journal of Chemistry* .
- Zuleta, E., Rios, L., & Calderón, J. (2012). Estudio de la estabilidad oxidativa de biodiésel de aceite de palma en contacto con materiales metálicos y poliméricos automotrices. *Ingeniería y Competitividad*, 14, 83 - 90.
- Zuleta, Ernesto ; Rios, Luis A; Calderón, Jorge. (2012). Estudio de la estabilidad oxidativa de biodiésel de aceite de palma en contacto con materiales

metálicos y poliméricos automotrices. *Ingeniería y Competitividad*, 14(2), 83 - 90.

Zuleta, Ernesto; Rios, Luis ; Benjumea, Pedro. (2012). Oxidative stability and coldflow behavior of palm, sacha-inchi, jatropha and castor oil biodiesel blends. *Fuel Processing Technology*, 102, 96-101.

Zuleta, E. C., Baenall, L., Rios, L. A., & Calderón, J. A. (2012). The oxidative stability of biodiesel and its impact on the deterioration of metallic and polymeric materials: a review. *Sociedade Brasileira de Química*, 23, 2159-2175.

## 12 ANEXOS

**Anexo 1. Resultados para índice de acidez bajo condiciones de almacenamiento**

	Agua	Luz	Temp °C	Muestra	t0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
<b>Valor de acidez (mg NaOH/g)</b>	seco	sin	20	1A	0,1348	0,1348	0,2697	0,2697	0,2697	0,2697	0,3371	0,4719	
	seco	sin	20	1B		0,1348	0,3371	0,2697	0,2697	0,2697	0,2697	0,2697	0,4045
	seco	sin	30	2A		0,2023	0,2697	0,2023	0,3371	0,2697	0,3371	0,3371	0,4045
	seco	sin	30	2B		0,1348	0,2697	0,2697	0,2697	0,3371	0,2697	0,2697	0,4719
	seco	con	20	3A		0,2697	0,2697	0,2697	0,2697	0,3371	0,2697	0,2697	0,3371
	seco	con	20	3B		0,2697	0,2023	0,2697	0,2697	0,3371	0,3371	0,3371	0,4045
	seco	con	30	4A		0,2023	0,2023	0,2023	0,2697	0,2697	0,3371	0,3371	0,4045
	seco	con	30	4B		0,2697	0,2023	0,2023	0,3371	0,3371	0,3371	0,3371	0,4719
	humedo	sin	20	5A		0,2023	0,2697	0,2023	0,3371	0,3371	0,2697	0,2697	0,4045
	humedo	sin	20	5B		0,2023	0,2697	0,2697	0,3371	0,2697	0,3371	0,3371	0,4719
	humedo	sin	30	6A		0,2697	0,2023	0,3371	0,3371	0,2697	0,3371	0,3371	0,4719
	humedo	sin	30	6B		0,2023	0,2023	0,2697	0,2697	0,3371	0,3371	0,3371	0,3371
	humedo	con	20	7A		0,2697	0,2023	0,2023	0,3371	0,3371	0,3371	0,3371	0,4045
	humedo	con	20	7B		0,2697	0,2697	0,2697	0,3371	0,3371	0,4045	0,4045	0,4045
	humedo	con	30	8A		0,2023	0,2697	0,2697	0,2697	0,2697	0,3371	0,3371	0,4045
	humedo	con	30	8B		0,1348	0,2697	0,2697	0,3371	0,2697	0,2697	0,3371	0,4719

**Anexo 2. Resultados para densidad bajo condiciones de almacenamiento**

	Agua	Luz	Temp °C	Muestra	t0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
<b>DENSIDAD kg/m3</b>	seco	sin	20	1A	877	864,9976	874,2587	869,8160	868,4467	866,4332	872,4061	868,0649
	seco	sin	20	1B		872,7671	862,3160	867,7866	867,4075	869,3160	871,4855	872,2671
	seco	sin	30	2A		864,9776	866,5175	868,5870	865,8972	863,1074	871,0214	866,0275
	seco	sin	30	2B		872,5171	875,4616	867,6271	869,3585	870,4646	870,4616	874,2270
	seco	con	20	3A		870,9472	868,6571	868,8356	865,7797	866,8143	869,2534	869,7373
	seco	con	20	3B		867,2874	872,2270	866,6397	869,6132	869,6091	871,1044	867,2474
	seco	con	30	4A		871,2172	871,5672	870,7713	870,6463	868,6571	872,6837	870,1072
	seco	con	30	4B		871,5872	869,1163	870,5754	870,4798	868,4030	872,7103	871,6872
	humedo	sin	20	5A		871,5872	867,2874	873,9840	873,9468	872,0474	876,3956	871,5672
	humedo	sin	20	5B		871,5672	874,2270	874,5717	874,4659	872,5066	874,1488	871,5572
	humedo	sin	30	6A		871,2372	870,6463	871,2512	871,1164	869,1163	869,2665	870,8672
	humedo	sin	30	6B		868,9273	869,6439	869,6939	869,6081	867,5725	868,7699	868,6373
	humedo	con	20	7A		872,5171	872,0474	871,8095	871,7334	869,6439	869,1576	872,9471
	humedo	con	20	7B		872,5671	870,6463	872,7401	871,6159	869,5266	871,5510	873,0271
	humedo	con	30	8A		866,5175	874,2729	869,4061	873,2221	871,1290	870,2729	866,5575
	humedo	con	30	8B		865,6075	869,5266	873,2984	873,2025	871,0215	868,9749	865,7275

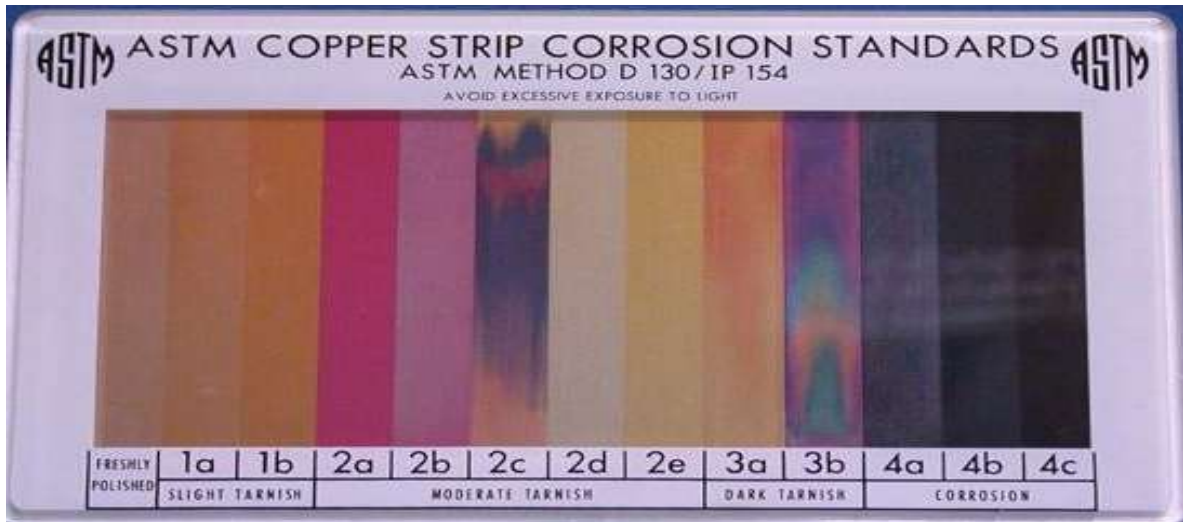
**Anexo 3. Resultados para viscosidad bajo condiciones de almacenamiento**

	Agua	Luz	Temp °C	Muestra	t0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
<b>viscosidad mm<sup>2</sup>/s</b>	seco	sin	20	1A	2,0596	5,2862	4,2693	4,9222	5,3380	5,6566	5,4501	5,8594
	seco	sin	20	1B		5,2158	4,2897	4,9574	5,2945	5,5131	5,3380	5,7289
	seco	sin	30	2A		4,9324	4,0350	4,5046	5,1908	5,4381	5,4686	5,9326
	seco	sin	30	2B		5,0408	4,0591	4,5518	5,3084	5,3853	5,4853	5,8891
	seco	con	20	3A		5,1982	4,2860	4,7963	5,1926	5,2621	5,4242	5,9113
	seco	con	20	3B		5,2084	4,3258	4,8213	5,2269	5,2964	5,3779	5,7733
	seco	con	30	4A		4,9417	4,3888	4,8796	5,2760	5,3223	5,4464	5,7344
	seco	con	30	4B		4,9500	4,3656	4,9130	5,3047	5,3001	5,4408	5,8039
	humedo	sin	20	5A		5,1741	5,3875	5,4834	5,5396	5,6595	5,7905	5,8920
	humedo	sin	20	5B		5,2130	5,3093	5,5834	5,5083	5,6309	5,7793	5,8987
	humedo	sin	30	6A		4,8250	4,3767	4,7472	5,2223	5,3353	5,3492	5,9289
	humedo	sin	30	6B		4,9148	4,4064	4,7620	5,2010	5,3584	5,3982	5,8242
	humedo	con	20	7A		5,0259	4,3675	4,7879	5,2815	5,4019	5,4408	5,7937
	humedo	con	20	7B		5,1084	4,4305	4,7620	5,2473	5,4510	5,4029	5,9196
	humedo	con	30	8A		5,0037	4,2101	4,9250	5,3186	5,2547	5,4760	5,8780
	humedo	con	30	8B		4,9796	4,2304	4,8787	5,2899	5,3056	5,4529	5,8113

**Anexo 4. Resultados para lámina de cobre bajo condiciones de almacenamiento**

Muestra	t0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1A	3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
1B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
2A		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
2B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
3A		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
3B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
4A		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
4B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
5A		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
5B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
6A		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
6B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
7A		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
7B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
8A		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a
8B		3a	3a	3a	3a	3a	3a	3a

**Anexo 5.** Guía estándar para identificación de lámina cobre (ASTM D 130)



**Anexo 6.** Resultados para la determinación del poder calorífico

	<b>Muestra</b>	<b>T1</b>	<b>T3</b>	<b>T5</b>	<b>T7</b>
<b>Poder calorífico (MJ/Kg)</b>	1	37,7974	36,7723	37,3993	37,3867
	2	36,5812	35,3874	37,2016	37,5699
	3	33,6951	35,2990	37,1493	37,4236
	4	37,9427	38,6507	37,0207	37,5167
	5	35,9019	36,4185	37,0024	37,3438
	6	33,3600	34,5813	33,0404	31,3101
	7	37,6990	37,0526	37,2016	37,2654
	8	34,6424	34,3227	37,3993	37,3989

Los experimentos resaltados en amarillo representan menor variabilidad y los que se encuentran en verde mayor variabilidad.

Exp1	a	b	c	d	b	fe	be	F
	0	15	30	45	60	75	90	105
Exp2	a	b	c	d	b	hf	bf	h
	0	15	30	45	60	75	90	105
Exp3	a	b	c	d	b	eb	e	h
	0	15	30	45	60	75	90	105
Exp4	a	b	a	b	c	c	d	e
	0	15	30	45	60	75	90	105
Exp5	a	b	c	d	e	e	e	f
	0	15	30	45	60	75	90	105
Exp6	a	b	c	b	d	de	e	f
	0	15	30	45	60	75	90	105
Exp7	a	b	c	d	e	e	e	f
	0	15	30	45	60	75	90	105
Exp8	a	b	c	b	d	d	e	f
	0	15	30	45	60	75	90	105

**Anexo 7.** Análisis estadístico viscosidad

**Anexo 8.** Análisis estadístico densidad

1	bc	ac	b	a	cd	ad	e	ac
	0	15	30	45	60	75	90	105
2	a	a	b	a	a	a	ab	a
	0	15	30	45	60	75	90	105
3	a	b	c	db	eb	fde	a	Gb
	0	15	30	45	60	75	90	105
4	ae	d	c	bd	bd	b	e	d
	0	15	30	45	60	75	90	105
5	ab	b	a	ab	ab	b	b	b
	0	15	30	45	60	75	90	105
6	a	b	c	b	b	b	a	b
	0	15	30	45	60	75	90	105
7	a	ac	b	ac	ac	c	a	ac
	0	15	30	45	60	75	90	105

8	a	b	c	de	e	f	a	gb
	0	15	30	45	60	75	90	105

**Anexo 9.** Análisis estadístico índice de acidez

1	a	a	b	B	b	b	b	c
	0	15	30	45	60	75	90	105
2	a	ac	ac	Ac	bc	bc	bc	b
	0	15	30	45	60	75	90	105
3	a	b	ab	Bc	bc	bc	bc	c
	0	15	30	45	60	75	90	105
4	a	ac	ac	Ad	cd	cd	bc	b
	0	15	30	45	60	75	90	105
5	a	ac	bc	Ac	bc	bc	bc	de
	0	15	30	45	60	75	90	105
6	b	ab	bd	Ab	ab	ab	acd	ac
	0	15	30	45	60	75	90	105
7	a	bc	ab	Ab	cbd	bcd	cd	d
	0	15	30	45	60	75	90	105
8	a	ac	cb	Bc	b	bc	bd	d
	0	15	30	45	60	75	90	105

**Anexo 10.** Valores p y F para los experimentos 1 a 8 del análisis de varianza con significativa en el nivel 0.05.

Experimento	Viscosidad		Contaminación		Densidad		Humedad		Acidez	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
1	795,811	<0,001	219,964	<0,001	63,537	<0,001	413,614	<0,001	22,432	<0,001
2	795,811	<0,001	265,220	<0,001	7,755	<0,001	418,378	<0,001	10,288	<0,001
3	1724,587	<0,001	278,934	<0,001	79,671	<0,001	864,571	<0,001	11,766	<0,001
4	5540,151	<0,001	391,095	<0,001	207,254	<0,001	223,639	<0,001	16,003	<0,001
5	2428,599	<0,001	124,400	<0,001	5,400	<0,001	325,719	<0,001	14,717	<0,001
6	1867,399	<0,001	310,095	<0,001	61,522	<0,001	358,289	<0,001	6,216	<0,001
7	1393,473	<0,001	244,821	<0,001	27,302	<0,001	197,711	<0,001	18,243	<0,001
8	3920,507	<0,001	377,771	<0,001	804,239	<0,001	442,517	<0,001	20,909	<0,001