

Efecto antioxidante de alfa tocoferol, BHT y TBHQ en el biodiesel de aceites vegetales

Antonio José Sáenz Grijalva

Zamorano, Honduras

Diciembre, 2008

ZAMORANO
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

Efecto antioxidante de alfa tocoferol, BHT y TBHQ en el biodiesel de aceites vegetales

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar
por el título de Ingeniero en Agroindustria Alimentaria en el Grado
Académico de Licenciatura.

Presentado por:

Antonio José Sáenz Grijalva

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2008

Efecto antioxidante de alfa tocoferol, BHT y TBHQ en el biodiesel de aceites vegetales

Presentado por:

Antonio José Sáenz Grijalva

Aprobado:

Francisco Javier Bueso, Ph.D.
Asesor Principal

Luis Fernando Osorio, Ph.D.
Director
Carrera Agroindustria Alimentaría

Luis Fernando Osorio, Ph.D.
Asesor

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.
Rector

RESUMEN

Sáenz, A. 2008. Efecto antioxidante de alfa tocoferol, BHT y TBHQ en la estabilidad oxidativa de biodiesel de aceites vegetales. Proyecto de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria; Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. 37p.

La estabilidad del biodiesel está determinada por el porcentaje de ácidos grasos insaturados del aceite. A diferencia del diesel, el biodiesel está limitado por su estabilidad oxidativa. Aún no existe un valor límite de peróxidos en biodiesel, aunque se encuentran estudios que muestran valores hasta de 300 a 400 meq. O₂ / kg de muestra sin que se presenten problemas en el motor del vehículo. El objetivo general del estudio versó, en evaluar el efecto de un antioxidante natural (alfa tocoferol 0.2 y 0.5%) y dos antioxidantes sintéticos (BHT y TBHQ, 0.2 y 0.5%) en cuanto a la estabilidad oxidativa de tres biodiesel (soya, maíz y palma); medido bajo condiciones de deterioro acelerado (39.7 °C y 91.1% HR), en comparación con las condiciones ambientales normales de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR). Se utilizó un diseño experimental de parcelas sub-subdivididas con tres repeticiones (días de elaboración de los biodiesel). Monitoreándose la estabilidad de oxidación de los biodiesel durante 120 días mediante índice de peróxidos (AOCS Cd 8-53), expresados en meq. de oxígeno por kg. Se determinó que el mejor antioxidante para todos los tratamientos fue el BHT en una concentración de 0.5 % (v/v). El biodiesel más estable fue el de palma con BHT 0.5 % (v/v) como era de esperarse; prolongando la vida útil en una relación de 3.67:1 día/día con respecto al control. El costo de los insumos para la elaboración de un kilogramo de biodiesel promedio fue L. 141.07, del cual el 61% provino del KOH (Hidróxido de potasio). El estudio demostró que los antioxidantes aumentaron la estabilidad oxidativa de los aceites.

Palabras clave: estabilidad oxidativa, peróxidos.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Hoja de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	9
5. CONCLUSIONES.....	21
6. RECOMENDACIONES.....	22
7. BIBLIOGRAFÍA.....	23
8. ANEXOS.....	25

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadro	Página
1. Cantidades (g) y porcentajes de biodiesel y glicerina	2
2. Perfil de ácidos grasos de los aceites usados en este estudio.....	4
3. Diseño experimental de parcelas sub-sub-divididas con medidas repetidas en el tiempo	7
4. Análisis de varianza (ANDEVA) de las fuentes de variación del estudio.....	9
5. Resumen del análisis estadístico del efecto de los tratamientos en el tiempo	10
6. Cambios en el índice de peróxidos del biodiesel de soya en ambiente de Zamorano durante los 120 días de almacenamiento.....	11
7. Cambios en el índice de peróxidos del biodiesel de soya en ambiente acelerado por el tiempo de almacenamiento	12
8. Cambios en el índice de peróxidos del biodiesel de palma africana en ambiente Zamorano durante los 120 días de almacenamiento.....	13
9. Cambio en el índice de peróxidos del biodiesel de palma africana en ambiente acelerado durante los 120 días de almacenamiento.....	14
10. Cambios en el índice de peróxidos del biodiesel de maíz en ambiente de Zamorano durante los 120 días del almacenamiento.....	15
11. Cambio en el índice de peróxidos del biodiesel de maíz en ambiente acelerado durante los 120 días de almacenamiento.....	16
12. Evaluación del deterioro de los controles del biodiesel a través del tiempo.....	17
13. Costos actuales unitarios de los insumos	20
14. Distribución de los costos de 1kg. de biodiesel por cada insumos de materia prima	20
Figura	Página
1. Reacción de oxidación de un ácido graso.....	3
Anexo	Página
1. Temperatura y humedad relativa diaria promedio de Zamorano durante el estudio	26
2. Temperatura y humedad relativa diaria promedio de la cámara de incubación durante el estudio	27
3. Condiciones ambientales de Zamorano.....	28

4.	Condiciones ambientales en la cámara de incubación.....	29
5.	Condiciones de la cámara de incubación (39.7 °C y 91.1% HR).	30
6.	Condiciones ambientales de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR).....	31
7.	Costos de la materia prima de cada tratamiento del estudio	32
8.	Evaluación de los ambientes sobre el deterioro por oxidación de los biodiesel	34
9.	Evaluación del deterioro por oxidación del biodiesel a través del tiempo.....	34
10.	Oxidación del biodiesel de aceite de soya en 120 días de almacenamiento.....	35
11.	Oxidación del biodiesel de aceite de palma africana en 120 días de almacenamiento.....	36
12.	Oxidación del biodiesel de aceite de maíz en 120 días de almacenamiento	37

1. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento en la demanda de fuentes alternativas de energía, este estudio dedicó su investigación y enfoque, a mejorar una fuente alternativa de energía como es el biodiesel. El cual puede llegar a ser la fuente sustituta total o parcial para el diesel fósil; contribuyendo a reducir problemas ambientales y económicos de actualidad.

Este estudio es parte de un gran estudio que se ha venido desarrollando en estos dos últimos años, por parte del LAAZ (Laboratorio de Análisis de Alimentos Zamorano). Siguiendo con la investigación para desarrollar la mejor tecnología y técnicas para mejorar la producción de biodiesel. En estudios realizados en años anteriores se determinó que a los 45 días el biodiesel elaborado de aceites de palma sin la presencia de ningún agente antioxidante, fue el que presentó mejor estabilidad oxidativa a diferencia de los otros cuatro aceites (soya, maíz, higuierilla y piñón). Siguiendo estos estudios, fue que se enfocó en prolongar la estabilidad oxidativa del biodiesel; comparando la estabilidad entre el biodiesel con el diesel fósil, pretendiendo mejorar la estabilidad oxidativa del primero, la cual está limitada por la oxidación de sus ácidos grasos, produciendo una gran desventaja del biodiesel sobre el diesel fósil. Se tomó como base los aceites con mayor producción mundial, por su disponibilidad en el mercado, el aceite de palma (con 31% de la producción mundial), el aceite de soya (con 30% de la producción mundial) y el de maíz (con 4% de la producción mundial). Exponiendo al biodiesel a diferentes condiciones ambientales de deterioro se puede evaluar el efecto de la temperatura sobre la concentración del antioxidante y cómo éste es afectado por el tiempo de almacenamiento. Al conocer el comportamiento en condiciones de almacenamiento, esto permite identificar los factores oxidantes y así aumentar la estabilidad oxidativa de cada biodiesel del estudio.

En el LAAZ (Laboratorio de Análisis de Alimentos Zamorano), se han realizado estudios sobre fuentes alternativas para la producción de biodiesel, entre ellos este estudio, en el cual se evaluó el efecto de un antioxidante natural (alfa tocoferol en concentraciones de 0.2 y 0.5%) y dos antioxidantes sintéticos (BHT y TBHQ, en concentraciones de 0.2 y 0.5%) en la estabilidad oxidativa de tres biodiesel (soya, maíz y palma), medido bajo condiciones de deterioro acelerado (39.7 °C y 91.1% HR), en comparación con las condiciones ambientales normales de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR), siendo este el objetivo general del estudio. Los objetivos específicos fueron: conocer el comportamiento de los tres biodiesel (soya, maíz y palma) sin antioxidante, bajo condiciones experimentales de almacenamiento; y determinar el efecto de la temperatura y el antioxidante sobre el porcentaje de ácidos grasos insaturados y cómo la misma afecta en su estabilidad oxidativa.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 DEFINICIÓN DE BIODIESEL

La ASTM (*American Society for Testing and Material*), describe al biodiesel como ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión. Sin embargo, los ésteres más utilizados, son los de metanol y etanol; obtenidos a partir de la transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales, grasas animales o de la esterificación de los ácidos grasos; debido a su bajo costo y sus ventajas químicas y físicas (Miliarium, 2004).

2.2 TRANSESTERIFICACIÓN

La reacción de transesterificación fue afectada cuando se disminuyó o aumentó la cantidad de etanol. La proporción 9:1 etanol/aceite fue la que presentó los mejores resultados en rendimientos, glicerina y tiempos de separación de fases (Baccaro, 2007).

Cuadro 1. Cantidades (g) y porcentajes de biodiesel y glicerina.

Descripción	Biodiesel	%	Glicerina	%	Evaporados	%
6:1 metanol Aceite	294.00 ^{a*}	97.54	43.83 ^{b*}	14.61	88.57 ^{c*}	18.91
9:1 etanol Aceite	290.00 ^{a*}	96.21	68.17 ^{ab*}	22.72	148.53 ^{b*}	27.07
12:1 etanol Aceite	282.83 ^{ab*}	93.83	88.83 ^{a*}	29.61	190.28 ^{a*}	31.86

*Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$)

**Fuente: Baccaro, 2007

En el Cuadro 1 se observa que los rendimientos del tratamiento 6:1 metanol/aceite y 9:1 etanol/aceite fueron significativamente superiores al resto (Baccaro, 2007).

2.3 ESTABILIDAD OXIDATIVA DEL BIODIESEL

El índice de peróxido (IP) mide el grado de oxidación primaria que ha sufrido la grasa o aceite. Los peróxidos son los productos de descomposición primaria de la oxidación de las grasas, cualquiera sea su composición. Se forman en los puntos de insaturación de las cadenas de carbonos de los ácidos grasos, tal como se puede apreciar en la Figura 1.

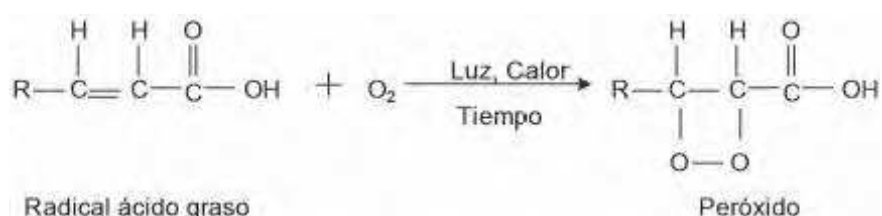


Figura 1. Reacción de oxidación de un ácido graso.

Luego de la formación de peróxidos ocurren reacciones secundarias de oxidación, que dan lugar a otros productos como perácidos, aldehídos, cetonas, alcoholes, etc. y posteriormente a compuestos cíclicos, aromáticos y polímeros; los cuales no son detectados por este índice. Por lo tanto, el IP sólo mide la primera fase de la oxidación de aceites y grasas.

La oxidación inducida por el aire a temperatura ambiente, se denomina *autooxidación*. Generalmente es un proceso lento, y se necesita un tiempo considerable para producir una cantidad suficiente de peróxidos que generen enranciamiento (Lawson, 1994). Los aceites que contienen una proporción más elevada de ácidos grasos insaturados, son más propensos a la oxidación que los que contienen cantidades más bajas, y los ácidos grasos con mayor cantidad de insaturaciones son aún más propensos.

La velocidad de oxidación crece con un incremento en la temperatura, con la exposición al oxígeno del aire, presencia de luz y contacto con materiales pro-oxidantes (por ejemplo, el cobre metálico, latón, bronce u otras aleaciones que contengan cobre) (Lawson, 1994). La oxidación se acelera por lo tanto, durante la fritura del aceite y también durante la estadía del biodiésel en el motor (Castro, 2007). La oxidación es favorecida a medida que aumente la concentración de ácidos grasos insaturados (esteárico, oleico, linoléico y linolénico). Mientras más ácidos grasos insaturados, necesita menos tiempo para absorber la misma cantidad de oxígeno y por consiguiente se oxidan más rápido (Universidad Mayor de San Andrés, 2007).

La estabilidad oxidativa de un aceite depende del grado de insaturación de los ácidos grasos (la relación entre mono y poli insaturados), la cantidad de antioxidantes naturales presentes y la presencia de trazas metálicas, así como de la disponibilidad de oxígeno, temperatura y luz (Rodríguez, 2008).

Cuadro 2. Perfil de ácidos grasos de los aceites usados en este estudio.

Nivel de saturación	Ácidos grasos	Número de carbonos y dobles enlaces	Aceites		
			Palma	Soya %	Maíz
Saturados	Mirístico	C14:0	1.0	0.1	0.0
	Palmítico	C16:0	45.2	11.0	10.0
	Esteárico	C18:0	4.9	1.5	3.0
	Araquídico	C20:0	0.0	0.0	0.0
	Palmitoléico	C16:1	0.0	0.0	0.0
Insaturados	Oléico	C18:1	38.0	21.6	40.0
	Ricínoléico	C18:1	0.0	0.0	0.0
	Vaccénico	C18:1	0.0	1.4	0.0
	Eicosanóico	C20:1	0.0	0.4	0.0
Poliinsaturados	Linoléico	C18:2	10.5	54.0	48.0
	Linolénico	C18:3	0.0	6.7	0.0

*Fuente: Quezada (2007).

2.4 ÍNDICE DE PERÓXIDOS RECOMENDADO PARA BIODIESEL

Todavía no existe un valor límite de peróxidos para el biodiesel. Según Monyem *et al.* (1999), llegaron a obtener hasta un valor de 300 - 400 meq. O₂ / kg de muestra sin que observaran problemas en el motor de los vehículos.

Anguaya (2007), desarrolló un análisis de estabilidad en almacenamiento del biodiesel obtenido de cinco aceites vegetales por 45 días. En condiciones ambientales normales de Zamorano (24 °C y 77% HR), todos los biodiesel al día cero presentaron valores bajos; a excepción del maíz que tuvo un valor inicial por encima de los demás biodiesel. Con el paso de los días, aumentaron significativamente sus valores de peróxidos y a los 45 días de análisis, los biodiesel que mostraron un alto índice de oxidación fueron el de maíz, piñón y soya, los cuales según la separación de medias, no fueron significativamente diferentes. Estos resultados se pueden sustentar técnicamente, porque el perfil de ácidos grasos de estos tres aceites como materia prima fue algo similar, debido a que presentaron números parecidos de insaturaciones en su perfil. Por su parte, los biodiesel que mostraron mayor estabilidad fueron palma e higuera, los cuales fueron estadísticamente iguales. Según Anguaya (2007), el perfil de los ácidos grasos insaturados está relacionado con la oxidación, lo cual podemos comprobar observando el Cuadro 2.

Según Anguaya (2007), los biodiesel en un ambiente caliente y húmedo (45 °C y 93% HR), presentaron un comportamiento similar a las condiciones normales al inicio mientras, a los 45 días los biodiesel que mostraron un alto índice de oxidación fueron el de maíz y soya, los cuales fueron significativamente diferentes, sobresaliendo considerablemente del resto. El mejor comportamiento fue mostrado por el biodiesel de palma e higuera, mientras que el piñón mostró un comportamiento intermedio.

Anderson, K. (2007), evaluaron el efecto de antioxidantes sintéticos como el BHT, BHA y TBHQ lo cuales fueron evaluados en biodiesel de aceite de soya con una baja estabilidad oxidativa, empleando el método de Rancimat (EN14112). En el estudio se evaluó concentraciones de antioxidantes desde 0 hasta 0.15%. El BHT exhibió una eficacia más alta en un rango de concentración a partir de 0.02 a 0.7 %. TBHQ exhibió un mejor potencial de estabilización cuando se usa en unas concentraciones mayores a 0.8%, mientras que el BHA no proporcionó ningún aumento durante el tiempo de inducción en las concentraciones mayores a 0.2%. La mezcla de estos antioxidantes, no rindió ninguna evidencia positiva que justifique el uso de mezclas.

2.5 ESTABILIDAD EN ALMACENAMIENTO

La estabilidad en almacenamiento se refiere a la capacidad del combustible a resistir cambios químicos durante largos períodos de almacenamiento. En una reacción de oxidación se generan cambios debido al contacto con el oxígeno del aire. El perfil de ácidos grasos del biodiesel es un factor importante que determina la estabilidad del combustible. Generalmente, los ácidos grasos poliinsaturados son los más susceptibles a la oxidación. La reacción de oxidación puede catalizarse por la presencia de ciertos metales y por la presencia de la luz. Al haber agua presente, se puede producir hidrólisis. Los cambios químicos en el combustible, que son asociados con la oxidación normalmente generan hidroperóxidos, los cuales a su vez producen ácidos grasos de cadena corta, cetonas y aldehídos. Bajo las condiciones adecuadas los hidroperóxidos pueden formar polímeros. Debido a esto la oxidación se puede llegar a determinar por un incremento en su acidez y/o su viscosidad, eso puede ser acompañado por cambios de color y olor (Gerpen, 2001).

Si los contenidos de acidez, viscosidad y sedimentos incrementan al punto que exceden los límites de ASTM, dicho combustible no podrá ser utilizado como tal. Los aditivos como BHT y TBHQ, son comunes en la industria alimenticia y ha sido comprobado, que mejora la estabilidad de almacenamiento del biodiesel. El biodiesel de aceite de soya naturalmente contiene antioxidantes (tocoferol: vitamina E), aportando protección contra la oxidación (durante el proceso de refinamiento se pierde un porcentaje de tocoferol), cualquier combustible que sea almacenado por un período mayor a seis meses debe ser tratado con antioxidantes (Gerpen, 1999).

LANXESS (2006), desarrolló Baynox® por la creciente demanda de un producto que extienda la vida útil del biodiesel. Este tiene un excelente efecto en biodiesel producido a partir de aceites de canola, aceite usado de cocina, grasa animal y aceite de palma. Estabiliza el biodiesel hecho de aceite de origen vegetal y que contiene una alta cantidad de ácidos grasos insaturados, tal es el caso del biodiesel de aceite de soya, de aceite de girasol y hasta para el aceite de *Jatropha*.

Según LANXESS (2007), de 0.03 a 0.05% de Baynox® añadido al biodiesel de nueva producción, son suficientes para alcanzar una estabilidad superior al estándar europeo de 6 horas. Así, el añadido de Baynox® al biodiesel aumenta la estabilidad a largo plazo del producto.. El conocido color amarillo del biodiesel se debe a la oxidación de antioxidantes naturales como la vitamina E, con Baynox® el biodiesel se mantiene claro e incoloro como el agua.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN

El estudio se realizó en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de la Universidad Zamorano, localizada a 30 km. de Tegucigalpa, a una altura de 814 msnm, en el Departamento Francisco Morazán, entre las siguientes coordenadas: N 14° Y O 87°, con una precipitación promedio anual de 1,100 mm, y una temperatura promedio anual de 24 °C.

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1 Materiales

- Aceite de palma, soya y maíz refinados blanqueados y desodorizados (RBD).
- Etanol anhidro, $\geq 99.5\%$ (200 proof) (Aldrich) 459836-1 A.C.S. reactivo.
- Hidróxido de potasio, pellet 85%, A.C.S. reactivo.
- Alfa Tocoferol, (Sigma), de aceite vegetal, Type V, $\sim 1000\text{IU/g}$.
- BHT, 3, 5-Di-*tert*-4-butylhydroxytoluene (BHT), (Supelco).
- TBHQ, 97% (Aldrich) reactivo.
- Cloroformo $\geq 99.8\%$ A.C.S. reagent (SigmaAldrich).
- Ácido acético 100% anhidro para análisis (MERCK).
- Yoduro de potasio, 99.99%, (Sigma-Aldrich), reactivo.
- Almidón, soluble A.C.S. reagent (Aldrich).

3.2.2 Equipo

- Cristalería del Laboratorio del LAAZ (Laboratorio de Análisis de Alimentos Zamorano).
- Bureta.
- Erlenmeyer de 100 ml.
- Agitadores magnéticos.
- Balanza analítica modelo AE 200 Metler®.
- Beakers de 1000 mL Kymax®.
- Decantadores de 250, 500 y 1000 mL Kymax®.
- Horno Fischer Isotemp Scientific®.
- Hornillas modelo PC-620 D Corning®.
- Termómetro.
- Cámara de incubación.

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un diseño experimental de parcelas sub-sub-divididas; con tres repeticiones (días de almacenamiento de los biodiesel) donde las parcelas principales fueron dos ambientes; normal de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR) y acelerado (39.7 °C y 91.1% HR). Las sub-parcelas fueron los tres biodiesel elaborados a partir de los aceites: de palma, soya, y maíz repetidas en el tiempo. Se evaluó la estabilidad de los biodiesel con tres antioxidantes: alfa tocoferol, BHT y TBHQ; y con dos concentraciones de antioxidantes para un total de 126 unidades experimentales (Cuadro 3).

Cuadro 3. Diseño experimental de parcela sub-sub-divididas con medidas repetidas en el tiempo.

Atmósfera Acelerada A1							Atmósfera Normal A2						
Aceite de soya (S)							Aceite de soya (S)						
	BHT		TBHQ		Tocoferol			BHT		TBHQ		Tocoferol	
control	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	control	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%
T1R1	T2R1	T3R1	T4R1	T5R1	T6R1	T7R1	T1R1	T2R1	T3R1	T4R1	T5R1	T6R1	T7R1
T1R2	T2R2	T3R2	T4R2	T5R2	T6R2	T7R2	T1R2	T2R2	T3R2	T4R2	T5R2	T6R2	T7R2
T1R3	T2R3	T3R3	T4R3	T5R3	T6R3	T7R3	T1R3	T2R3	T3R3	T4R3	T5R3	T6R3	T7R3
Aceite de maíz (M)							Aceite de maíz (M)						
	BHT		TBHQ		Tocoferol			BHT		TBHQ		Tocoferol	
control	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	control	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%
T1R1	T2R1	T3R1	T4R1	T5R1	T6R1	T7R1	T1R1	T2R1	T3R1	T4R1	T5R1	T6R1	T7R1
T1R2	T2R2	T3R2	T4R2	T5R2	T6R2	T7R2	T1R2	T2R2	T3R2	T4R2	T5R2	T6R2	T7R2
T1R3	T2R3	T3R3	T4R3	T5R3	T6R3	T7R3	T1R3	T2R3	T3R3	T4R3	T5R3	T6R3	T7R3
Aceite de palma (P)							Aceite de palma (P)						
	BHT		TBHQ		Tocoferol			BHT		TBHQ		Tocoferol	
control	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	control	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%	0.2%	0.5%
T1R1	T2R1	T3R1	T4R1	T5R1	T6R1	T7R1	T1R1	T2R1	T3R1	T4R1	T5R1	T6R1	T7R1
T1R2	T2R2	T3R2	T4R2	T5R2	T6R2	T7R2	T1R2	T2R2	T3R2	T4R2	T5R2	T6R2	T7R2
T1R3	T2R3	T3R3	T4R3	T5R3	T6R3	T7R3	T1R3	T2R3	T3R3	T4R3	T5R3	T6R3	T7R3

3.4 ELABORACIÓN DEL ETIL-ÉSTER

El etil-éster se produjo a partir de tres aceites (palma, soya y maíz); se utilizó una relación de 9:1 (etanol: aceite) según los resultados de Baccaro (2007), al cual se le agregó el KOH (hidróxido de potasio) como catalizador. De éste se agregó 0.01% del peso del aceite. Se calentó a 50 – 60 °C por una hora. Al finalizar la hora se agregó 1/3 del peso del aceite de agua destilada a 80 °C. Se agitó inmediatamente y se colocó en el decantar, esperando 45 min para que se separaran las fases. Después fueron secadas las muestras a 105 °C por 12 hr.

3.5 ANÁLISIS QUÍMICOS

Determinación de índice de peróxidos (AOCS Cd 8-53).

El método cuantifica todas las sustancias que oxidan al yoduro de potasio y se expresa como meq. O₂/kg de muestra. Se aplicó a cualquier grasa o aceite, pero si se trata de otros productos es necesario extraerle al menos 5 g de grasa para hacer el análisis.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el estudio se utilizó el programa estadístico SAS[®] (Statistical Analysis System) versión 9.1 con una separación de medias ajustadas Tukey de significancia ($P < 0.05$) y un análisis estadístico para medidas repetidas en el tiempo (Wilks' Lambda).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estabilidad oxidativa del biodiesel en este estudio se logró acelerar exponiendo los tratamientos a temperatura promedio de 39.7 °C y humedad relativa promedio de 91.1% por 120 días. Como era de esperarse, la estabilidad oxidativa estuvo íntimamente relacionada con el perfil de ácidos grasos (siendo esto un factor decisivo para la estabilidad). El maíz con un 88%, la soya con 75.6% y la palma con 48.5% de ácidos grasos insaturados. Esto demostró en que el biodiesel con mayor porcentaje de ácidos grasos insaturados fue el que presentó mayor oxidación.

Cuadro 4. Análisis de varianza (ANDEVA) de las fuentes de variación del estudio.

Fuente de variación	DF	C.M.	F	Pr > 0.05*
Ambiente	1	79319.59	21.12	<.0001
Aceite	2	60418.63	8.04	0.0004
Antioxidante	3	148560.43	13.18	<.0001
Concentración	1	5665.84	1.51	0.2203
Tiempo	6	102306.56	27.24	<.0001
Error	323	3756.11		

*Probabilidades significativas a > 0.05 .

En el análisis de varianza se pudo determinar que el ambiente, aceite, antioxidantes y el tiempo (en días) fueron los factores que determinaron ser estadísticamente significativos para el estudio. La concentración fue el único factor no significativo por tener una probabilidad menor a 0.05. Esto puede observarse en el Cuadro 4, donde la probabilidad de la concentración no fue significativa para el estudio. Se encontró interacción entre ambiente y aceite, aceite y antioxidante pero no hubo interacción significativa de la concentración con ninguno de los factores como el tiempo, aceite y antioxidante.

Otros factores que afectaron directamente a los tratamientos fueron la temperatura y el tiempo de almacenamiento. La temperatura tuvo un efecto de inhibición sobre los antioxidantes. El α -tocoferol fue inhibido por la temperatura, permitiéndole al biodiesel con α -tocoferol oxidarse a niveles por encima del control. En cuanto al tiempo de almacenamiento fue directamente proporcional al nivel de oxidación del biodiesel; la oxidación no pudo ser detenida por los antioxidantes pero sí fue retardada. Para ratificar la anterior afirmación, se realizó el análisis estadístico para medidas repetidas por el tiempo Wilks' Lambda (Cuadro 5).

Cuadro 5. Resumen del análisis estadístico del efecto de los tratamientos en el tiempo.

Fuentes de variación	Pr > F*
Tiempo	<.0001
Tiempo*ambiente	<.0001
Tiempo*aceite	<.0001
Tiempo*antioxidante	<.0001
Tiempo*concentración	0.0388

*Probabilidades significativas a > 0.05 .

Según Izquierdo (2007), los tratamientos de temperatura modificaron la concentración de tocoferoles totales en el aceite de girasol y soya. En maíz, el tratamiento 20-28 °C presentó una menor concentración de tocoferoles totales en el aceite. A través de ese estudio, se determinó que el efecto antioxidante del tocoferol fue inhibido por la temperatura, lo que permitió que este reportara índice de peróxidos iguales o superiores al control.

Los parámetros para calificar el mejor tratamiento fueron: mantener constante sus índices de peróxidos a través del almacenamiento; mantener su oxidación (evaluada mediante el índice de peróxidos) estable a través del tiempo de almacenamiento y siendo el mejor tratamiento el que tenga una diferencia estadística para el día 120 (el índice de peróxidos más bajo).

4.1 BIODIESEL DE SOYA EN AMBIENTE DE ZAMORANO

Cuadro 6. Cambios en el índice de peróxidos del biodiesel de soya en ambiente de Zamorano durante los 120 días de almacenamiento.

Antioxidante	Día 0*	Día 1*	Día 7*	Día 30*	Día 60*	Día 90*	Día 120*
Control	1.0 c	3.9 bc	5.6 bc	8.0 b	13.1 b	25.8 a	36.7 b
BHT 0.2%	1.0 c	3.7 c	4.1 cd	5.6 c	7.2 d	14.2 c	18.7 e
BHT 0.5%	1.7 bc	1.7 d	3.7 d	4.7 d	6.3 d	13.1 c	15.9 f
TBHQ 0.2%	1.7 bc	1.6 d	5.9 b	8.5 b	10.9 c	18.1 b	25.8 c
TBHQ 0.5%	3.6 b	4.7 b	6.3 b	8.6 b	11.3 c	27.8 a	37.0 b
Tocoferol 0.2%	6.6 a	8.0 a	8.8 a	10.5 a	16.1 a	27.5 a	38.7 a
Tocoferol 0.5%	2.0 bc	2.4 d	8.0 a	10.2 a	12.5 b	18.3 b	23.4 d

Medias con diferente letra en las columnas son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

*Letras en negrilla son los mejores tratamientos para cada día.

Todos los valores están expresados en meq de O_2 /kg. de muestra.

Bajo condiciones ambientales de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR) (Anexo 3), al día cero el biodiesel de soya presentó en todos los tratamientos índices de peróxidos por debajo del límite establecido para los aceites (5 meq. O_2 /kg de muestra); a excepción del biodiesel con tocoferol 0.2% que tuvo un valor inicial de 6.6 meq. O_2 /kg de muestra, es decir, que este tratamiento mostró una mayor tendencia inicial a oxidarse. Esto pudo haber ocurrido por falta de práctica del laboratorista a la hora de medir los índices de peróxidos. El control al día cero registró 1.0 meq. O_2 /kg de muestra, con el paso de los días los índices de peróxidos aumentaron significativamente, llegando a reportar al día 120 del estudio un valor de 36.7 meq. O_2 /kg de muestra.

El tratamiento con tocoferol 0.2% para el biodiesel de soya en condiciones ambientales de Zamorano al día 120, mostró un comportamiento prooxidante, el cual se puede observar en el Cuadro 6 o Anexo 10, con un índice de peróxido superior del control.

En contraste, los que presentaron la mayor estabilidad oxidativa al día 120 fueron el biodiesel con BHT 0.2% (v/v) (18.66 meq O_2 /kg de muestra) y BHT 0.5% (v/v) (15.93 meq. O_2 /kg de muestra). Para este antioxidante en particular podemos observar cómo la concentración de BHT afectó la estabilidad del biodiesel, siendo la concentración del antioxidante inversamente proporcional a la oxidación.

4.2 BIODIESEL DE SOYA EN AMBIENTE DE OXIDACIÓN ACELERADA

Cuadro 7. Cambios en el índice de peróxidos del biodiesel de soya en ambiente acelerado por el tiempo de almacenamiento.

Antioxidante	Día 0*	Día 1*	Día 7*	Día 30*	Día 60*	Día 90*	Día 120*
Control	1.0 c	2.9 c	9.4 cd	29.6 ab	78.8 a	110.5 c	146.7 c
BHT 0.2%	1.0 c	3.5 c	6.9 de	11.1 c	28.7 c	51.3 d	84.0 d
BHT 0.5%	1.7 bc	2.9 c	5.7 e	10.1 c	26.7 c	46.3 d	67.6 de
TBHQ 0.2%	1.7 bc	6.8 abc	10.3 c	16.9 bc	29.7 c	41.7 d	52.0 e
TBHQ 0.5%	3.6 b	5.3 bc	18.4 b	25.0 abc	30.1 c	45.8 d	56.1 de
Tocoferol 0.2%	6.6 a	10 a	23.2 a	37.6 a	46.9 b	299.3 a	598.0 a
Tocoferol 0.5%	2.0 bc	8.9 ab	23.6 a	28.3 abc	31.2 c	246.0 b	452.3 b

Medias con diferente letra en las columnas son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

*Letras en negrilla son los mejores tratamientos para cada día.

Todos los valores están expresados en meq de O_2 /kg de muestra.

Bajo condiciones ambientales de deterioro acelerado ($39.7\text{ }^\circ\text{C}$ y 91.1% HR) (Anexo 4), al día cero el biodiesel de soya presentó en todos los tratamientos índices de peróxidos por debajo del límite establecido para los aceites ($5\text{ meq. }O_2/\text{kg}$ de muestra); a excepción del tocoferol 0.2% que tuvo un valor inicial de $6.6\text{ meq. }O_2/\text{kg}$ de muestra, es decir, que este tratamiento mostró una mayor tendencia inicial a oxidarse. Esto pudo haber ocurrido por falta de práctica del laboratorista a la hora de medir índices de peróxidos. El control al día cero registró $1.0\text{ meq. }O_2/\text{kg}$ de muestra, con el paso de los días los índices de peróxidos aumentaron significativamente, al día 30 del estudio fue observado un incremento significativamente superior de los índices de peróxidos, llegando a reportar al día 120 del estudio un valor de $146.7\text{ meq. }O_2/\text{kg}$ de muestra.

Los tratamientos con tocoferol 0.2 y 0.5% en el biodiesel de soya en condiciones de deterioro acelerado al día 120 mostraron un comportamiento prooxidante, a diferencia de los tratamientos con TBHQ 0.2 y 0.5% , los cuales presentaron una mayor estabilidad debido a que este antioxidante reacciona mejor a condiciones donde hay temperaturas y humedad más elevadas. También registró un efecto antioxidante retardado (Cuadro 7 o Anexo 10).

En contraste, los tratamientos que presentaron la mayor estabilidad oxidativa al día 120 fueron al igual que en condiciones ambientales de Zamorano; los tratamientos de biodiesel con BHT 0.2 y 0.5% y los biodiesel con TBHQ 0.2 y 0.5% . Para este antioxidante en particular (BHT) podemos observar cómo la concentración afectó la estabilidad del biodiesel, siendo la concentración del antioxidante inversamente proporcional a la oxidación.

4.3 BIODIESEL DE PALMA EN AMBIENTE DE ZAMORANO

Cuadro 8. Cambios en el índice de peróxidos del biodiesel de palma africana en ambiente Zamorano durante los 120 días de almacenamiento.

Antioxidante	Día 0*	Día 1*	Día 7*	Día 30*	Día 60*	Día 90*	Día 120*
Control	1.3 a	1.6 b	2.6 bc	4.0 b	4.8 b	7.4 de	10.0 de
BHT 0.2%	0.9 a	1.7 b	1.7 d	2.3 d	4.3 b	5.3 f	6.7 f
BHT 0.5%	1.1 a	1.9 ab	2.5 bcd	3.0 cd	4.8 b	6.2 ef	8.7 e
TBHQ 0.2%	1.1 a	1.9 ab	4.8 a	6.4 a	8.1 a	15.1 b	17.7 b
TBHQ 0.5%	1.4 a	3.0 a	4.9 a	6.3 a	8.2 a	19.9 a	22.8 a
Tocoferol 0.2%	1.3 a	1.2 b	3.3 b	4.5 b	8.8 a	10.8 c	14.3 c
Tocoferol 0.5%	1.8 a	1.8 b	2.4 cd	3.8 bc	4.4 b	8.6 d	11.2 d

Medias con diferente letra en las columnas son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

*Letras en negrilla son los mejores tratamientos para cada día.

Todos los valores están expresados en meq de O_2/kg de muestra.

Bajo condiciones ambientales de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR) (Anexo 3), al día cero el biodiesel de palma mostró ser estadísticamente igual entre los tratamientos y presentó en todos los tratamientos índices de peróxidos por debajo del límite establecido para los aceites (5 meq. O_2/kg de muestra). El control al día cero registró 1.3 meq. O_2/kg de muestra, con el paso de los días los índices de peróxidos aumentaron significativamente, al día 90 del estudio se registró un incremento significativamente superior de los índices de peróxidos, llegando a reportar al día 120 del estudio valores de 10 meq. O_2/kg de muestra.

Los tratamientos con tocoferol 0.2%, TBHQ 0.2% y TBHQ 0.5% para el biodiesel de palma en condiciones ambientales de Zamorano al día 120 presentaron un comportamiento prooxidante (Cuadro 8 y Anexo 11). A concentraciones muy elevadas, una sustancia antioxidante se transforma en prooxidante y ayuda a incrementar los radicales libres (Universidad de la Rioja, 2006).

En contraste con los tratamientos, el que presentó la mayor estabilidad oxidativa al día 120 fue el biodiesel con BHT 0.2% (v/v). Este fue el mejor tratamiento ya que registró al día 120 índices de peróxidos de 6.7 meq. O_2/kg de muestra. Al incrementar la concentración del BHT de 0.2 a 0.5% no se registró ninguna mejora significativa en la estabilidad oxidativa del biodiesel.

4.4 BIODIESEL DE PALMA EN AMBIENTE DE OXIDACIÓN ACELERADA

Cuadro 9. Cambio en el índice de peróxidos del biodiesel de palma africana en ambiente acelerado durante los 120 días de almacenamiento.

Antioxidante	Día 0*	Día 1*	Día 7*	Día 30*	Día 60*	Día 90*	Día 120*
Control	1.3 a	1.7 bc	2.1 c	9.3 a	29.3 a	34.6 b	43.8 b
BHT 0.2%	0.9 a	1.3 c	1.9 c	2.0 c	5.5 b	12.8 de	25.0 c
BHT 0.5%	1.1 a	1.5 bc	2.0 c	3.8 bc	6.4 b	10.0 e	12.7 e
TBHQ 0.2%	1.1 a	1.9 b	2.2 c	3.1 c	5.8 b	16.3 de	19.5 d
TBHQ 0.5%	1.4 a	2.9 a	3.1 b	4.0 bc	6.0 b	19.6 cd	23.2 cd
Tocoferol 0.2%	1.3 a	2.9 a	4.0 a	7.0 ab	6.5 b	58.9 a	91.6 a
Tocoferol 0.5%	1.8 a	2.7 a	4.0 a	4.3 bc	5.0 b	25.7 c	44.0 b

Medias con diferente letra en las columnas son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

*Letras en negrilla son los mejores tratamientos para cada día.

Todos los valores están expresados en meq. de O_2 /kg de muestra.

Bajo condiciones ambientales de deterioro acelerado ($39.7\text{ }^\circ\text{C}$ y 91.1% HR) (Anexo 3), al día cero el biodiesel de palma mostró ser estadísticamente igual entre tratamientos y presentó en todos los tratamientos índices de peróxidos por debajo del límite establecido para los aceites (5 meq. O_2 /kg de muestra). El control al día cero registró 1.3 meq. O_2 /kg de muestra, con el paso de los días el índice de peróxidos aumentó significativamente, al día 30 del estudio en el control se registró un incremento significativamente superior de los índices de peróxidos, llegando a reportar al día 120 del estudio valores de 43.8 meq. O_2 /kg de muestra.

El tratamiento con tocoferol 0.2 % para biodiesel de palma en condiciones de deterioro acelerado al día 120 registró un comportamiento prooxidante obteniendo un índice de peróxido superior al control.

En contraste el tratamiento que presentó la mayor estabilidad oxidativa al día 120 fue el biodiesel con BHT 0.5% (v/v), porque registró al día 120 un índice de peróxidos de 12.7 meq. O_2 /kg de muestra, presentando una estabilidad mayor a diferencia de los otros tratamientos (Cuadro 9 o Anexo 11). Al incrementar la concentración del BHT de 0.2 a 0.5% se registró una mejora significativa en la estabilidad del biodiesel de palma, siendo la concentración del antioxidante inversamente proporcional a la oxidación.

4.5 BIODIESEL DE MAÍZ EN AMBIENTE DE ZAMORANO

Cuadro 10. Cambios en el índice de peróxidos del biodiesel de maíz en ambiente de Zamorano durante los 120 días del almacenamiento.

Antioxidante	Día 0*	Día 1*	Día 7*	Día 30*	Día 60*	Día 90*	Día 120*
Control	3.7 bc	5.6 ab	8.7 cd	14.8 de	32.9 ab	72.6 a	107.8 a
BHT 0.2%	4.8 abc	5.2 b	7.8 d	14.1 de	23.2 de	32.6 c	55.0 c
BHT 0.5%	4.9 ab	5.6 ab	6.8 d	13.3 e	22.1 e	33.2 c	40.8 d
TBHQ 0.2%	2.5 c	6.0 ab	9.9 c	20.5 b	29.1 bc	57.1 b	83.6 b
TBHQ 0.5%	3.3 bc	4.6 b	12.4 a	26.3 a	34.1 a	60.4 ab	88.6 b
Tocoferol 0.2%	5.6 ab	7.5 a	11.9 ab	18.3 c	27.9 cd	57.2 b	83.2 b
Tocoferol 0.5%	6.5 a	7.5 a	10.2 bc	15.4 d	24.0 de	68.0 ab	86.8 b

Medias con diferente letra en las columnas son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

*Letras en negrilla son los mejores tratamientos para cada día.

Todos los valores están expresados en meq. de O_2 /kg de muestra.

Bajo condiciones ambientales de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR) (Anexo 3), al día cero el biodiesel de maíz mostró bajos índices de peróxidos (Cuadro 10). El control al día cero registró valores de 3.7 meq. O_2 /kg de muestra, el cual está dentro del límite permitido de índice de peróxidos para los aceites (5 meq. O_2 /kg de muestra). Al día uno esté ya superó el límite permitido para aceites. Con el paso de los días los índices de peróxidos aumentaron significativamente, al día 60 se registró un incremento significativamente superior de los índices de peróxidos, llegando a reportar al día 120 del estudio valores de 107.8 meq. O_2 /kg de muestra.

Los tratamientos con tocoferol 0.2 y 0.5%, TBHQ 0.2 y 0.5%, para el biodiesel de maíz en condiciones ambientales de Zamorano presentaron al día 120 efecto antioxidante obteniendo índices de peróxidos inferiores sobre el control del biodiesel de maíz, como era de esperarse. En el Cuadro 10 o Anexos 12 se puede observar que para el biodiesel de maíz al día 120, los tratamientos con TBHQ y tocoferol registraron valores estadísticamente iguales sin importar su concentración.

En contraste el que presentó la mayor estabilidad oxidativa al día 120 fue del biodiesel con BHT 0.2 y 0.5% (v/v). Al incrementar la concentración del BHT de 0.2 a 0.5% en el biodiesel de maíz se registró una mejora significativa en la estabilidad oxidativa, siendo la concentración del antioxidante inversamente proporcional a la oxidación del biodiesel.

4.6 BIODIESEL DE MAÍZ EN AMBIENTE DE OXIDACIÓN ACELERADA

Cuadro 11. Cambio en el índice de peróxidos del biodiesel de maíz en ambiente acelerado durante los 120 días de almacenamiento.

Antioxidante	Día 0*	Día 1*	Día 7*	Día 30*	Día 60*	Día 90*	Día 120*
Control	3.7 bc	7.0 bcd	19.4 a	44.1 a	82.6 a	109.1 a	138.8 a
BHT 0.2%	4.8 abc	9.4 ab	15.2 c	31.5 c	54.4 ef	80.0 bc	104.8 b
BHT 0.5%	4.9 ab	9.0 abc	16.8 bc	27.5 d	49.8 f	64.6 c	86.5 c
TBHQ 0.2%	2.5 c	6.5 cd	11.4 d	37.3 b	57.2 de	88.3 ab	115.5 b
TBHQ 0.5%	3.3 bc	11.6 a	17.8 ab	35.6 b	62.5 cd	80.4 bc	108.5 b
Tocoferol 0.2%	5.6 ab	9.2 ab	15.2 c	42.6 a	70.1 b	81.4 bc	106.8 b
Tocoferol 0.5%	6.5 a	6.2 d	14.8 c	37.7 b	66.4 bc	73.3 bc	102.5 bc

Medias con diferente letra en las columnas son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

*Letras en negrilla son los mejores tratamientos para cada día.

Todos los valores están expresados en meq. de O_2 /kg de muestra.

Bajo condiciones ambientales de deterioro acelerado ($39.7^\circ C$ y 91.1% HR) (Anexo 4), al día cero el biodiesel de maíz mostró bajos índices de peróxidos (Cuadro 11). El control al día cero registró 3.7 meq. O_2 /kg de muestra, el cual estuvo dentro del límite permitido de índice de peróxidos para los aceites (5 meq. O_2 /kg de muestra). Al primer día del estudio se duplicó su índice de peróxido, el que superó el límite permitido. Con el paso de los días el índice de peróxidos aumentó significativamente, al día 30 se registró un incremento significativamente superior de los índices de peróxidos, llegando a reportar al día 120 del estudio valores de 138.8 meq. O_2 /kg de muestra.

Los tratamientos con tocoferol 0.2%, tocoferol 0.5%, TBHQ 0.2%, TBHQ 0.5% y BHT 0.2%, para el biodiesel de maíz en condiciones ambientales de deterioro acelerado al día 120 mostraron efecto antioxidante sobre el biodiesel de maíz, donde el control tuvo índices de peróxidos significativamente superiores a los tratamientos, como era de esperarse.

El tratamiento que mantuvo más estable su oxidación a través del tiempo de almacenamiento fue el biodiesel con BHT 0.5% (86.5 meq. O_2 /kg de muestra) el cual comparado al control fue significativamente más estable, siendo el mejor tratamiento para el biodiesel de maíz a condiciones ambientales de deterioro acelerado (Cuadro 11 o Anexo 12).

La efectividad de un antioxidante está determinada por su composición química y estructural. Según esta afirmación el alfa tocoferol debería ser el mejor antioxidante debido a su composición química ($C_{29}H_{50}O_2$), ya que tiene 50 hidrógenos los cuales reaccionan con los radicales libres previniendo la oxidación. Pero resultó ser ineficaz porque es afectado por la temperatura y la concentración, convirtiéndolo en un prooxidante.

El BHT se consideró el mejor antioxidante, ya que mantuvo su estabilidad pese al cambio de temperatura. La efectividad del antioxidante está dada por la cantidad de hidrógenos que tengan disponibles para reaccionar con los radicales libres y así prevenir la oxidación de los ácidos grasos.

Los biodiesel de soya, maíz y palma son diferentes, debido al perfil de ácidos grasos que conforman cada aceite. El aceites de maíz, con un 88%, es el que contiene mayor % de ácidos grasos insaturados y el aceite de soya con un 75.6% de ácidos grasos insaturados y 7 % de 18:3 (linolénico), fueron los que obtuvieron valores elevados de índices de peróxidos, por ende una mayor oxidación. Por otro lado, el biodiesel de palma, con un 48.5% de ácidos grasos insaturados, fue el que presentó la mejor estabilidad oxidativa sobre el biodiesel de maíz y soya, por ende una menor oxidación.

4.7 COMPORTAMIENTO DE LOS BIODIESEL SIN ANTIOXIDANTE DURANTE EL ALMACENAMIENTO A CONDICIONES AMBIENTALES DE ZAMORANO (24.4 °C Y 74.8% HR).

Cuadro 12. Evaluación del deterioro de los biodiesel a condiciones ambientales de Zamorano a través del tiempo.

Aceite	Día 0*	Día 1*	Día 7*	Día 30*	Día 60*	Día 90*	Día 120*
Maíz	4.47 a	7.22 a	12.75 a	27.11 a	45.48 a	70.41 a	118.08 a
Soya	2.49 b	4.77 b	10.00 b	15.35 b	24.98 b	68.46 a	93.54 b
Palma	1.26 c	2.00 c	2.99 c	4.42 c	7.73 c	17.96 b	25.12 c

* Medias con diferente letra en las columnas son significativamente diferentes (P<0.05).

El comportamiento entre los biodiesel a condiciones ambientales de Zamorano sin antioxidantes fue constante a través de los 120 días de almacenamiento (Cuadro 12). El control del biodiesel de maíz fue el que presentó una estabilidad oxidativa inferior a los demás. El control del biodiesel de soya, al igual que el de maíz, presentó una estabilidad oxidativa inferior, pero a lo largo del estudio no llegó a sobrepasar los niveles de oxidación del control del biodiesel de maíz siendo significativamente diferente; sólo al día 90 el control del biodiesel de soya fue significativamente igual al control del biodiesel de maíz. El control del biodiesel de palma fue el que presentó la mejor estabilidad oxidativa, siendo este significativamente diferente a el de los otros controles.

4.8 TASA DE OXIDACION PARA LOS BIODIESEL.

La tasa de oxidación fue determinada para cada biodiesel con la finalidad de conocer la relación entre las dos condiciones ambientales evaluadas, ambiente acelerado (39.7 °C y 91.1% HR) y ambiente normal de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR). Por medio de una regresión lineal se determinó la ecuación de la pendiente de la oxidación de cada biodiesel, la cual nos permitió conocer la tendencia de la línea. Por medio de esto se evaluó comparando el control de cada biodiesel en sus dos ambientes (ambiente acelerado y ambiente normal).

La regresión lineal para la oxidación del control del biodiesel de soya determinó la siguiente ecuación de la pendiente:

$$y = 0.271x + 1.553 \quad [1]$$

donde “x” = días de almacenamiento y “y” = meq. de O₂/kg de muestra, la cual fue comparada contra la regresión lineal para la oxidación del control de soya en el ambiente acelerado el cual determinó la siguiente ecuación de la pendiente:

$$y = 1.225x + 0.237 \quad [2]$$

donde “x” = días de almacenamiento y “y” = meq. de O₂/kg de muestra, las cuales determinaron una relación de 4.50:1, es decir que la oxidación obtenida en 4.50 días en el ambiente normal equivalen a un día en ambiente acelerado. Por medio de este método se determinó la relación que hubo entre el control sobre el mejor tratamiento. En el caso del biodiesel de soya el mejor tratamiento fue BHT 0.5%, el cual dió una relación de 2.86:1 sobre el control; es decir que la oxidación obtenida en 2.86 días en el control, equivale a un día del mejor tratamiento para el biodiesel de soya.

La regresión lineal para la oxidación del control del biodiesel de palma africana determinó la siguiente ecuación de la pendiente:

$$y = 0.066x + 1.618 \quad [3]$$

donde “x” = días de almacenamiento y “y” = meq. de O₂/kg de muestra, la cual fue comparada contra la regresión lineal para la oxidación del control de palma africana en el ambiente acelerado el cual determinó la siguiente ecuación de la pendiente:

$$y = 0.374x + 0.989 \quad [4]$$

donde “x” = días de almacenamiento y “y” = meq. de O₂/kg de muestra, las cuales determinaron una relación de 5.13:1, es decir que la oxidación obtenida en 5.13 días en el ambiente normal equivalen a un día en ambiente acelerado. Por medio de este método se determinó la relación que hubo entre el control sobre el mejor tratamiento. En el caso del biodiesel de palma africana el mejor tratamiento fue BHT 0.5% el cual dió una relación 3.67:1 sobre el control, es decir que la oxidación obtenida en 3.67 días en el control equivale a un día del mejor tratamiento para el biodiesel de palma africana.

La regresión lineal para la oxidación del control del biodiesel de maíz determinó la siguiente ecuación de la pendiente:

$$y = 0.824x + 1.094 \quad [5]$$

donde “x” = días de almacenamiento y “y” = meq. de O₂/kg de muestra, la cual fue comparada contra la regresión lineal para la oxidación del control de maíz en el ambiente acelerado, el cual determinó la siguiente ecuación de la pendiente:

$$y = 1.118x + 8.642 \quad [6]$$

donde “x” = días de almacenamiento y “y” = meq. de O₂/kg de muestra, las cuales determinaron una relación de 1.38:1, es decir que la oxidación obtenida en 1.38 días en el ambiente normal equivalen a un día en ambiente acelerado. Por medio de este método se determinó la relación que hubo entre el control sobre el mejor tratamiento. En el caso del biodiesel de maíz el mejor tratamiento fue BHT 0.5% el cual dió una relación 2.12:1 sobre el control, es decir que la oxidación obtenida en 2.12 días en el control equivale a un día del mejor tratamiento para el biodiesel de maíz.

Esto determinó que el % de ácidos grasos insaturados (Cuadro 2), está relacionado con la estabilidad oxidativa de cada aceite. El biodiesel de maíz fue el de menor estabilidad oxidativa, la cual fue afectada por su 88% de ácidos grasos insaturados, seguido el biodiesel de soya el cual también tuvo similar comportamiento al biodiesel de maíz, el cual fue afectado por su 75.6% de ácidos grasos insaturados y 7 % de 18:3 (linolénico). El biodiesel de palma africana fue el que presentó la mejor estabilidad oxidativa. Esto puede ser relacionado con el % de ácidos grasos insaturados que es de 48.5%, donde el % de ácidos grasos insaturados es inversamente proporcional a la estabilidad oxidativa.

El mejor antioxidante fue para este estudio el que bajó más la pendiente en el ambiente de Zamorano (24.4 °C y 74.8% HR) que en el ambiente de la cámara de incubación (39.7 °C y 91.1% HR). Esto se puede observar en los biodiesel con BHT como antioxidante donde la ecuación [1] tiene menos pendiente que la ecuación [2] por la influencia de la condición ambiental, y así de dió para los otros dos biodiesel por igual, siendo la ecuación con menos pendiente la de menor temperatura y menor humedad relativa.

4.9 ANÁLISIS DE COSTO DE MATERIA PRIMA.

La situación actual se encuentra sumergida en una incertidumbre dada por el precio volátil del petróleo, teniendo repercusiones directas en los precios de los alimentos, insumos y materias primas, encareciéndolos.

Cuadro 13. Costos actuales unitarios de los insumos.

Materia prima	Cantidad	Precio \$
Palma**	kg	0.954
Soya**	kg	1.126
Maíz**	kg	3.78
Etanol**	kg	0.74
KOH*	g	0.47
BHT*	g	0.02
TBHQ*	g	0.11
α Tocoferol*	g	0.62

Fuente: *©2008 Chicago Board of Trade

Fuente: **Copyrights © 2008 Sigma-Aldrich Co.

Fuente: De Marzo (2007).

Cuadro 14. Distribución de los costos de un kg de biodiesel por cada insumo de materia prima.

Materia prima	%
Aceite	23
Etanol 9:1	5
KOH	61
Antioxidante	11

Se determinó que un análisis de los costos variables, era lo más recomendable para determinar el precio del biodiesel. Tomando en cuenta la volatilidad del precio de los insumos utilizados para la producción de biodiesel en los últimos seis meses y el precio del diesel fósil (en Honduras se ha mantenido alrededor de los L. 78 en el último año), nos da una idea de qué tan rentable sería producir biodiesel. En promedio producir un kg de biodiesel en el presente estudio, tuvo un costo de L. 104.01 (con los costos unitarios de materia prima del Cuadro 13), donde el 61% de los costos es dado por el hidróxido de potasio (catalizador) (Cuadro 14). El costo de cada tratamiento de este estudio se encuentra en el Anexo 7.

5. CONCLUSIONES

- El efecto del antioxidante estuvo condicionado por la insaturación del aceite y las condiciones ambientales a las que fue expuesto, el cual determinó que no hubo un antioxidante universal para el biodiesel.
- Para las condiciones ambientales evaluadas, el biodiesel de palma con BHT 0.5 % (v/v) fue el que presentó la mejor estabilidad oxidativa.
- Para ambientes donde la temperatura y humedad relativa estén alrededor de 39.7 °C y 91.1% HR, el antioxidante más recomendado es BHT 0.5% y TBHQ 0.5% en el caso del biodiesel de palma y soya.
- Para ambientes donde su temperatura y humedad relativa sean alrededor de 24.4 °C y 74.8% HR, el antioxidante más recomendado es BHT 0.5%.
- El biodiesel de palma africana es el más recomendable para la producción de biocombustible en las condiciones ambientales de El Zamorano.
- El tocoferol fue un agente prooxidante en el biodiesel de soya, maíz y palma africana.

6. RECOMENDACIONES

- Mediante parámetros de calidad del biodiesel, determinar la vida de anaquel del biodiesel de palma con BHT 0.5 %(v/v).
- Evaluar el comportamiento en el campo del biodiesel de palma con BHT 0.5 %(v/v) y determinar qué nivel de peróxidos baja significativamente el rendimiento del biodiesel.
- Hacer un análisis calorimétrico para determinar si el uso de antioxidantes afecta caloriméricamente el biodiesel a través del tiempo.
- Hacer pruebas de solubilidad de los biodiesel con antioxidantes en diesel fósil a diferentes concentraciones.
- Buscar una alternativa más económica para el hidróxido de potasio.
- Hacer un análisis del efecto del antioxidante en las propiedades físicas (color, olor) del biodiesel.

7. BIBLIOGRAFÍA

Anderson, K. 2007. The Influence of BHA, BHT and TBHQ on the Oxidation Stability of Soybean Oil Ethyl Esters (Biodiesel) (en línea). Consultado el 27 de septiembre 2007. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-50532007000200026&lng=en%5D&nrm=iso

Anguaya, C. 2007. Estudio de estabilidad en almacén del biodiesel obtenido de aceite de soya (*Glycine max*), palma africana (*Elaeis guineensis*), maíz (*Zea mays*), higuerilla (*Ricinus communis*) y piñón (*Jatropha curcas*). 58p.

Baccaro, R. 2007. Evaluación de rendimiento de biodiesel elaborado a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y etanol anhidro de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). 21p.

Castro, P. 2007. Libro del Biodiesel (en línea). Consultado el 25 de octubre de 2008. Disponible en: <http://www.solucionespracticas.org.pe/publicaciones/pdf/prousbio.pdf>

Chicago Board of Trade. 2008. Commodity news for tomorrow. (En línea). Consultado el 25 de octubre de 2008. Disponible en <http://www.cbot.com/cbot/pub/page/0,3181,963,00.html>

De Marzo, O. 2007. Análisis de rentabilidad de producción de biodiesel en la planta piloto de Zamorano a partir de aceites de palma africana (*Elaeis guineensis*), maíz (*Zea mays*) y soya (*Glycine max*). 24p.

Gerpen, JV. 1999. Investigation of biodiesel Thermal Stability under Simulated in-used condition. University of Idaho (en línea). Consultado el 25 de septiembre de 2008. Disponible en: www.nrel.gov/vehiclesandfuels/nbf/pdfs/39096.pdf

Gerpen, JV. 2001. Biodiesel Production and Fuel Quality. University of Idaho (en línea). Consultado el 5 de octubre de 2008. Disponible en <http://www.uiweb.uidaho.edu/bioenergy/biodieselED/publication/01.pdf>

Izquierdo, N. 2007. Factores determinantes de la calidad de aceite en diferentes especies (en línea). Consultado el 12 de septiembre de 2008. Disponible en: www.inta.gov.ar/balcarce/ResumenesPG/PGPV2005/Resumen%20avance%20Izquierdo.doc

LANXESS, 2006. Baynox® plus stabilizes biodiesel made from soya (en línea). Consultado 28 de Septiembre 2007. Disponible en: http://corporate.lanxess.com/en/no_cache/corporate-home/company/company-news/company-news-singleview/print.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=8712

LANXESS, 2007. El biocombustible ya es (casi) perfecto: Lanxess desarrolla un antioxidante sintético para biodiesel a partir de aceite de canola, aceite de palma, grasa animal, soja, girasol e incluso jatrofa (en línea). Consultado 28 de Septiembre 2007. Disponible en <http://www.invenia.es/invenia.media:biofuel.summit.f>

Lawson, H. 1994. Aceites y grasas alimentarios - Tecnología, utilización y nutrición. Zaragoza: Editorial Acribia. 333p.

Miliarium, S. 2004. Biodiesel (en línea). Consultado el 30 de agosto de 2008. Disponible en:
<http://www.miliarium.com/Monografias/Biocombustibles/Biodiesel/Biodiesel.asp>

Monyem, A., M. Canakci, and J. Van Gerpen. 1999. Investigation of Biodiesel thermal Stability Under Simulated In-Use Conditions. Iowa State University. Consultado el 3 de agosto de 2008.

Quezada, JC. 2007. Evaluación de la energía de combustión y otros parámetros físico-químicos del biodiesel obtenido a partir de cinco aceites vegetales. 37p.

Rodriguez, M. 2008. Ciencias y Tecnologías de los alimentos. Aceites y grasas (en línea). Consultado el 30 de agosto de 2008. Disponible en:
http://www.uclm.es/profesorado/mdsalvador/58119/practicass/trabajos_alumnos/Rancimat_Manuel_Rodriguez_y_MJose_Villasol.doc

Sigma-Aldrich, 2008. Sigma-Aldrich Co. (en línea). Consultado el 3 de septiembre de 2008. Disponible en:
http://www.sigmaaldrich.com/Area_of_Interest/The_Americas/United_States.html

Universidad de la Rioja. 2006. Antioxidantes y alimentos (en línea). Consultado el 7 de noviembre de 2008. Disponible en:
https://www.unirioja.es/apnoticias/servlet/Archivo?C_BINARIO=1849

Universidad Mayor de San Andrés. 2007. Adecuación tecnológica de la obtención de biodiesel (en línea). Consultado el 20 de octubre de 2008. Disponible en:
http://www.pncc.gov.bo/esp/pq-pncc/PRIMERA%20CONVOCATORIA/UMSA-IIDEPROQ/doc%20biodiesel_UMSA_IIDEPROQ_PNCC.pdf

8. ANEXOS

Anexo 1. Temperatura y humedad relativa diaria promedio de Zamorano durante el estudio.

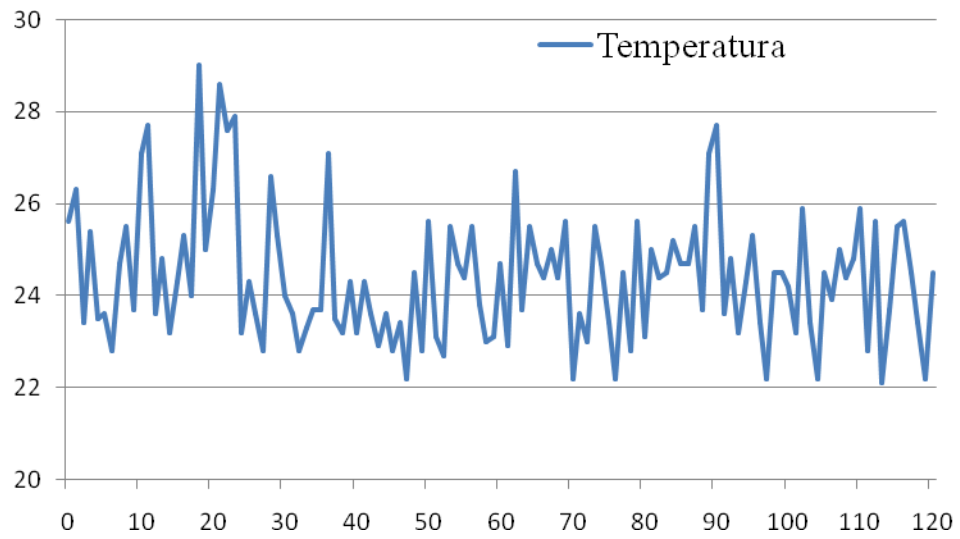


Figura 1. Temperatura diaria promedio de Zamorano durante el estudio.

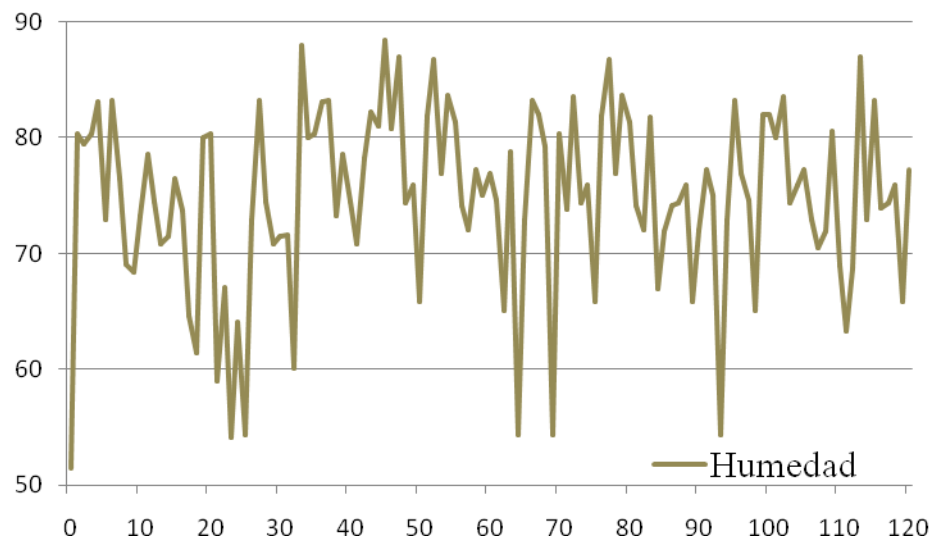


Figura 2. Humedad relativa diaria promedio de Zamorano durante el estudio.

Anexo 2. Temperatura y humedad relativa diaria promedio de la cámara de incubación del estudio.

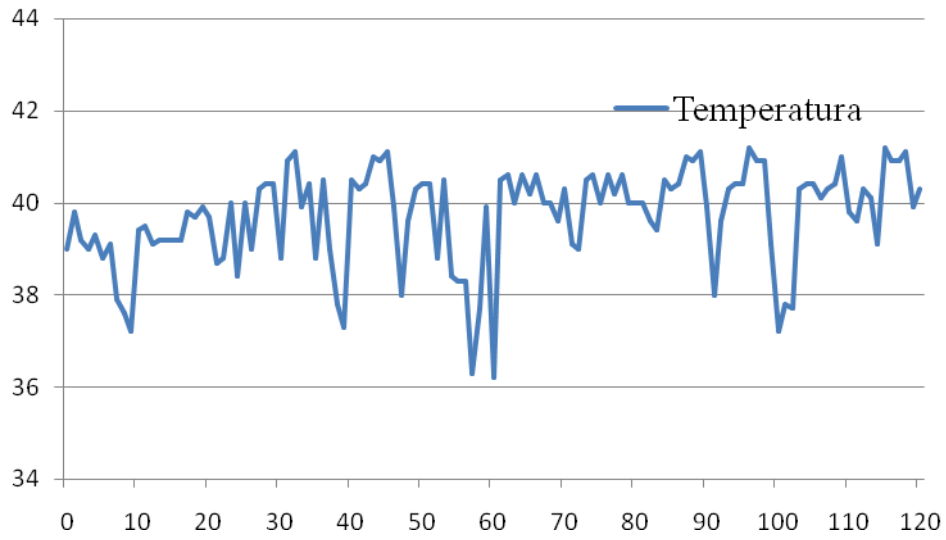


Figura 1. Temperatura diaria promedio de la cámara de incubación del estudio.

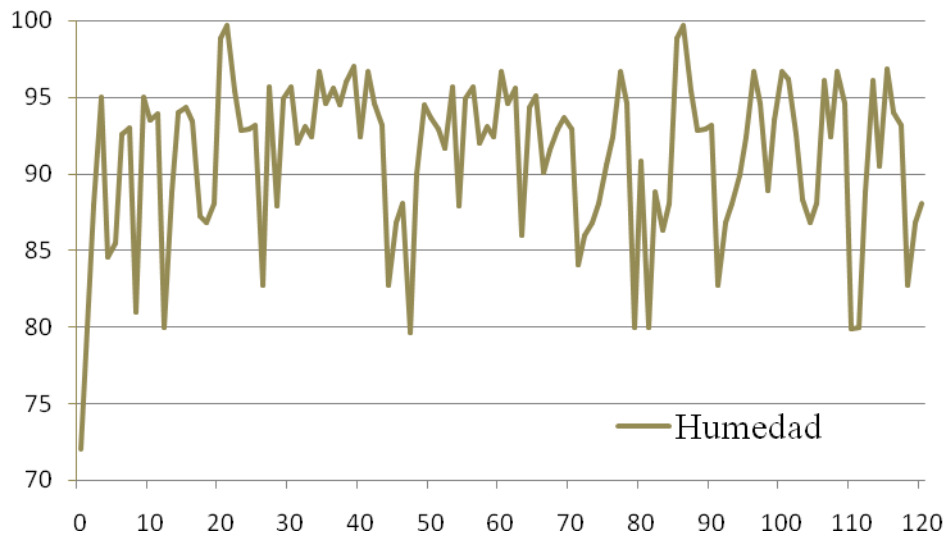


Figura 2. Humedad relativa diaria promedio de la cámara de incubación del estudio.

Anexo 3. Condiciones ambientales de Zamorano.

Día	Temperatura	Humedad	Día	Temperatura	Humedad	Día	Temperatura	Humedad	
0	25.6	51.5	40	23.2	74.5	80	23.1	81.4	
1	26.3	80.4	41	24.3	70.8	81	25	74.2	
2	23.4	79.5	42	23.6	78.3	82	24.4	72.1	
3	25.4	80.4	43	22.9	82.3	83	24.5	81.8	
4	23.5	83.1	44	23.6	81	84	25.2	67	
5	23.6	72.9	45	22.8	88.4	85	24.7	72	
6	22.8	83.3	46	23.4	80.8	86	24.7	74.2	
7	24.7	76.5	47	22.2	87	87	25.5	74.4	
8	25.5	69.1	48	24.5	74.4	88	23.7	75.9	
9	23.7	68.4	49	22.8	75.9	89	27.1	65.9	
10	27.1	73.3	50	25.6	65.9	90	27.7	72.1	
11	27.7	78.6	51	23.1	81.9	91	23.6	77.3	
12	23.6	74.5	52	22.7	86.8	92	24.8	75.1	
13	24.8	70.8	53	25.5	76.9	93	23.2	54.4	
14	23.2	71.5	54	24.7	83.7	94	24.3	72.9	
15	24.3	76.5	55	24.4	81.4	95	25.3	83.3	
16	25.3	73.7	56	25.5	74.2	96	23.4	76.9	
17	24	64.7	57	23.8	72.1	97	22.2	74.6	
18	29	61.4	58	23	77.3	98	24.5	65.1	
19	25	80	59	23.1	75.1	99	24.5	82	
20	26.3	80.4	60	24.7	76.9	100	24.2	82	
21	28.6	59	61	22.9	74.6	101	23.2	80	
22	27.6	67.1	62	26.7	65.1	102	25.9	83.6	
23	27.9	54.1	63	23.7	78.8	103	23.4	74.4	
24	23.2	64.1	64	25.5	54.4	104	22.2	75.9	
25	24.3	54.4	65	24.7	72.9	105	24.5	77.3	
26	23.6	72.9	66	24.4	83.3	106	23.9	73	
27	22.8	83.3	67	25	82	107	25	70.5	
28	26.6	74.5	68	24.4	79.3	108	24.4	72	
29	25.3	70.8	69	25.6	54.4	109	24.8	80.6	
30	24	71.5	70	22.2	80.4	110	25.9	69	
31	23.6	71.6	71	23.6	73.8	111	22.8	63.3	
32	22.8	60.1	72	23	83.6	112	25.6	68.7	
33	23.3	88	73	25.5	74.4	113	22.1	87	
34	23.7	80	74	24.7	75.9	114	23.7	72.9	
35	23.7	80.4	75	23.4	65.9	115	25.5	83.3	
36	27.1	83.1	76	22.2	81.9	116	25.6	74	
37	23.5	83.3	77	24.5	86.8	117	24.5	74.4	
38	23.2	73.3	78	22.8	76.9	118	23.4	75.9	
39	24.3	78.6	79	25.6	83.7	119	22.2	65.9	
40	23.2	74.5	80	23.1	81.4	120	24.5	77.3	
							Promedio	24.4	74.8

Anexo 4. Condiciones ambientales en la cámara de incubación.

Día	Temperatura	Humedad	Día	Temperatura	Humedad	Día	Temperatura	Humedad	
0	39	72	40	40.5	92.4	80	40	90.8	
1	39.8	80	41	40.3	96.7	81	40	80	
2	39.2	88	42	40.4	94.6	82	39.6	88.8	
3	39	95	43	41	93.2	83	39.4	86.3	
4	39.3	84.6	44	40.9	82.7	84	40.5	88.1	
5	38.8	85.5	45	41.1	86.8	85	40.3	98.8	
6	39.1	92.6	46	39.9	88.1	86	40.4	99.7	
7	37.9	93	47	38	79.6	87	41	95.4	
8	37.6	81	48	39.6	90	88	40.9	92.8	
9	37.2	95	49	40.3	94.5	89	41.1	92.9	
10	39.4	93.5	50	40.4	93.7	90	39.9	93.2	
11	39.5	93.9	51	40.4	92.9	91	38	82.7	
12	39.1	80	52	38.8	91.7	92	39.6	86.8	
13	39.2	88.8	53	40.5	95.7	93	40.3	88.1	
14	39.2	94	54	38.4	87.9	94	40.4	89.9	
15	39.2	94.3	55	38.3	94.9	95	40.4	92.4	
16	39.2	93.4	56	38.3	95.7	96	41.2	96.7	
17	39.8	87.2	57	36.3	92	97	40.9	94.6	
18	39.7	86.8	58	37.7	93.1	98	40.9	88.9	
19	39.9	88.1	59	39.9	92.4	99	39.1	93.5	
20	39.7	98.8	60	36.2	96.7	100	37.2	96.7	
21	38.7	99.7	61	40.5	94.6	101	37.8	96.2	
22	38.8	95.4	62	40.6	95.6	102	37.7	92.6	
23	40	92.8	63	40	86	103	40.3	88.3	
24	38.4	92.9	64	40.6	94.3	104	40.4	86.8	
25	40	93.2	65	40.2	95.1	105	40.4	88.1	
26	39	82.7	66	40.6	90.1	106	40.1	96.1	
27	40.3	95.7	67	40	91.6	107	40.3	92.4	
28	40.4	87.9	68	40	92.9	108	40.4	96.7	
29	40.4	94.9	69	39.6	93.7	109	41	94.6	
30	38.8	95.7	70	40.3	92.9	110	39.8	79.9	
31	40.9	92	71	39.1	84.1	111	39.6	80	
32	41.1	93.1	72	39	86	112	40.3	88.8	
33	39.9	92.4	73	40.5	86.8	113	40.1	96.1	
34	40.4	96.7	74	40.6	88.1	114	39.1	90.5	
35	38.8	94.6	75	40	90.6	115	41.2	96.8	
36	40.5	95.6	76	40.6	92.4	116	40.9	94	
37	39	94.5	77	40.2	96.7	117	40.9	93.2	
38	37.8	96	78	40.6	94.6	118	41.1	82.7	
39	37.3	97	79	40	80	119	39.9	86.8	
40	40.5	92.4	80	40	90.8	120	40.3	88.1	
							Promedio	39.7	91.1

Anexo 5. Condiciones de la cámara de incubación (39.7°C y 91.1% HR).

Biodiesel	Trt.	Día	meq. O₂/ kg	Biodiesel	Trt.	Día	meq. O₂/ kg
Maíz	Control	0	3.7bc	Maíz	Control	120	138.867a
	BHT 0.2%	0	4.8abc		BHT 0.2%	120	104.8b
	BHT 0.5%	0	4.9ab		BHT 0.5%	120	86.467c
	TBHQ 0.2%	0	2.4667c		TBHQ 0.2%	120	115.53b
	TBHQ 0.5%	0	3.333bc		TBHQ 0.5%	120	108.467b
	Toco 0.2%	0	5.6ab		Toco 0.2%	120	106.867b
	Toco 0.5%	0	6.533a		Toco 0.5%	120	102.533bc
Palma	Control	0	1.3 ^a	Palma	Control	120	43.867b
	BHT 0.2%	0	0.9 ^a		BHT 0.2%	120	25c
	BHT 0.5%	0	1.133a		BHT 0.5%	120	12.733e
	TBHQ 0.2%	0	1.1 ^a		TBHQ 0.2%	120	19.467d
	TBHQ 0.5%	0	1.367a		TBHQ 0.5%	120	23.2cd
	Toco 0.2%	0	1.3 ^a		Toco 0.2%	120	91.667a
	Toco 0.5%	0	1.7667a		Toco 0.5%	120	44.067b
Soya	Control	0	1.0c	Soya	Control	120	146.667c
	BHT 0.2%	0	1.0c		BHT 0.2%	120	84.0d
	BHT 0.5%	0	1.667bc		BHT 0.5%	120	67.667d
	TBHQ 0.2%	0	1.667bc		TBHQ 0.2%	120	52.0d
	TBHQ 0.5%	0	3.5667b		TBHQ 0.5%	120	56.133d
	Toco 0.2%	0	6.5667a		Toco 0.2%	120	598.0a
	Toco 0.5%	0	2.0bc		Toco 0.5%	120	452.333b

Condiciones ambientales aceleradas (39.7 °C y 91.1% HR)

Anexo 6. Condiciones ambientales de Zamorano (24.4°C y 74.8% HR).

Biodiesel	Trt	Día	meq. O₂/ kg	Biodiesel	Trt	Día	meq. O₂/ kg
	Control	0	3.7bc		Control	120	107.867a
	BHT 0.2%	0	4.8abc		BHT 0.2%	120	55.067c
	BHT 0.5%	0	4.9ab		BHT 0.5%	120	40.867d
Maíz	TBHQ 0.2%	0	2.4667c	Maíz	TBHQ 0.2%	120	83.60b
	TBHQ 0.5%	0	3.333bc		TBHQ 0.5%	120	88.60b
	Toco 0.2%	0	5.6ab		Toco 0.2%	120	83.20b
	Toco 0.5%	0	6.533a		Toco 0.5%	120	86.867b
	Control	0	1.3a		Control	120	10.067de
	BHT 0.2%	0	0.9a		BHT 0.2%	120	6.7333f
	BHT 0.5%	0	1.133a		BHT 0.5%	120	8.733e
Palma	TBHQ 0.2%	0	1.1a	Palma	TBHQ 0.2%	120	17.733b
	TBHQ 0.5%	0	1.367a		TBHQ 0.5%	120	22.80a
	Toco 0.2%	0	1.3a		Toco 0.2%	120	14.33c
	Toco 0.5%	0	1.7667a		Toco 0.5%	120	11.267d
	Control	0	1.0c		Control	120	36.73b
	BHT 0.2%	0	1.0c		BHT 0.2%	120	18.667e
	BHT 0.5%	0	1.667bc		BHT 0.5%	120	15.933f
Soya	TBHQ 0.2%	0	1.667bc	Soya	TBHQ 0.2%	120	25.80c
	TBHQ 0.5%	0	3.5667b		TBHQ 0.5%	120	37.0b
	Toco 0.2%	0	6.5667a		Toco 0.2%	120	37.733a
	Toco 0.5%	0	2.0bc		Toco 0.5%	120	23.4667d

Condiciones ambientales normales (24.4 °C y 74.8% HR)

Anexo 7. Costos de la materia prima de cada tratamiento del estudio.

TRT	Materia prima	Cantidad	Unidad	Precio	Total	\$	L.	%
T1	Palma 9:1	668.6	g	0.00095	0.638	4.05	76.89	16
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			6
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			78
	control	0.0	g	0.00000	0.000			0
T2	Palma 9:1	668.6	g	0.00095	0.638	4.09	77.65	16
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			6
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			78
	bht 0,2%	2.0	g	0.02000	0.040			1
T3	Palma 9:1	668.6	g	0.00095	0.638	4.15	78.79	15
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			6
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			76
	bht 0,5%	5.0	g	0.02000	0.100			2
T4	Palma 9:1	668.6	g	0.00095	0.638	4.27	81.11	15
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			6
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			74
	tbhq 0,2%	2.0	g	0.11100	0.222			5
T5	Palma 9:1	668.6	g	0.00095	0.638	4.60	87.44	14
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			5
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			69
	tbhq 0,5%	5.0	g	0.11100	0.555			12
T6	Palma 9:1	668.6	g	0.00095	0.638	5.30	100.68	12
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			5
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			60
	toco 0,2%	2.0	g	0.62600	1.252			24
T7	Palma 9:1	668.6	g	0.00095	0.638	7.18	136.36	9
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			3
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			44
	toco 0,5%	5.0	g	0.62600	3.130			44
T1	Soya 9:1	668.6	g	0.00113	0.753	4.16	79.08	18
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			6
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			76
	control	0.0	g	0.00000	0.000			0
T2	Soya 9:1	668.6	g	0.00113	0.753	4.20	79.84	18
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			6
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			75
	bht 0,2%	2.0	g	0.02000	0.040			1
T3	Soya 9:1	668.6	g	0.00113	0.753	4.26	80.98	18
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			6
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			74
	bht 0,5%	5.0	g	0.02000	0.100			2
T4	Soya 9:1	668.6	g	0.00113	0.753	4.38	83.30	17
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			5
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			72
	tbhq 0,2%	2.0	g	0.11100	0.222			5
T5	Soya 9:1	668.6	g	0.00113	0.753	4.72	89.62	16
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			5
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			67
	tbhq 0,5%	5.0	g	0.11100	0.555			12

TRT	Materia prima	Cantidad	Unidad	Precio	Total	\$	L.	%
T6	Soya 9:1	668.6	g	0.00113	0.753	5.41	102.87	14
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			4
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			59
	toco 0,2%	2.0	g	0.62600	1.252			23
T7	Soya 9:1	668.6	g	0.00113	0.753	7.29	138.55	10
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			3
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			43
	toco 0,5%	5.0	g	0.62600	3.130			43
T1	Maíz 9:1	668.6	g	0.00379	2.533	5.94	112.90	43
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			4
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			53
	control	0.0	g	0.00000	0.000			0
T2	Maíz 9:1	668.6	g	0.00379	2.533	5.98	113.66	42
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			4
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			53
	bht 0,2%	2.0	g	0.02000	0.040			1
T3	Maíz 9:1	668.6	g	0.00379	2.533	6.04	114.80	42
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			4
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			52
	bht 0,5%	5.0	g	0.02000	0.100			2
T4	Maíz 9:1	668.6	g	0.00379	2.533	6.16	117.12	41
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			4
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			51
	tbhq 0,2%	2.0	g	0.11100	0.222			4
T5	Maíz 9:1	668.6	g	0.00379	2.533	6.50	123.44	39
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			4
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			49
	tbhq 0,5%	5.0	g	0.11100	0.555			9
T6	Maíz 9:1	668.6	g	0.00379	2.533	7.19	136.69	35
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			3
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			44
	toco 0,2%	2.0	g	0.62600	1.252			17
T7	Maíz 9:1	668.6	g	0.00379	2.533	9.07	172.37	28
	etanol	324.8	g	0.00074	0.240			3
	KOH	6.7	g	0.47400	3.169			35
	toco 0,5%	5.0	g	0.62600	3.130			35
Promedio						5.47	104.01	

Anexo 8. Evaluación de los ambientes sobre el deterioro por oxidación de los biodiesel.

Ambiente	meq. O₂/ kg*
Acelerado (39.7 °C y 91.1% HR)	46.79 a
Normal (24.4 °C y 74.8% HR)	13.40 b

*Medias con la misma letra en las columnas son significativamente iguales (P>0.05)

Anexo 9. Evaluación del deterioro por oxidación del biodiesel a través del tiempo.

Tiempo	meq. O₂/ kg*
Día 0	2.36 g
Día 1	5.52 f
Día 7	10.53 e
Día 30	16.09 d
Día 60	30.02 c
Día 90	73.79 b
Día 120	139.93 a

*Medias con la misma letra en las columnas son significativamente iguales (P>0.05)

Anexo 10. Oxidación del biodiesel con aceite de soja en 120 días de almacenamiento.

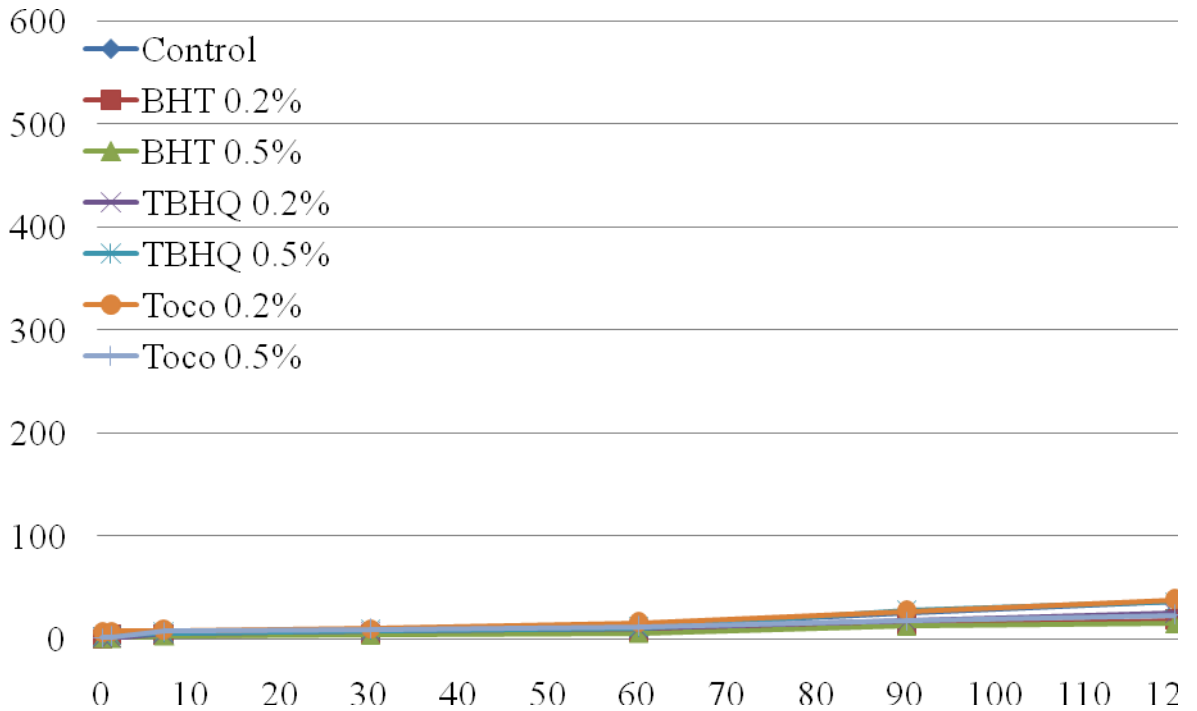


Figura 1. Oxidación del biodiesel de soja almacenado a 24.4 °C y 74.8% HR.

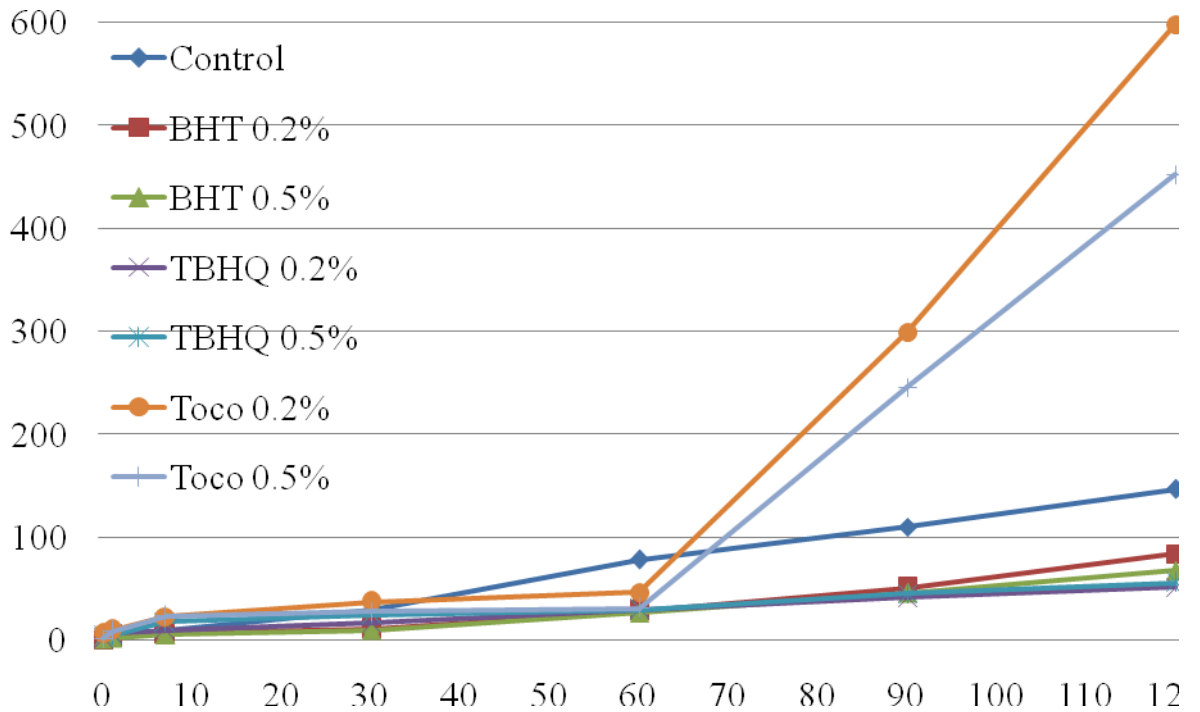


Figura 2. Oxidación del biodiesel de soja almacenado a 39.7 °C y 91.1% HR.

Anexo 11. Oxidación del biodiesel con aceite de palma africana en 120 días de almacenamiento.

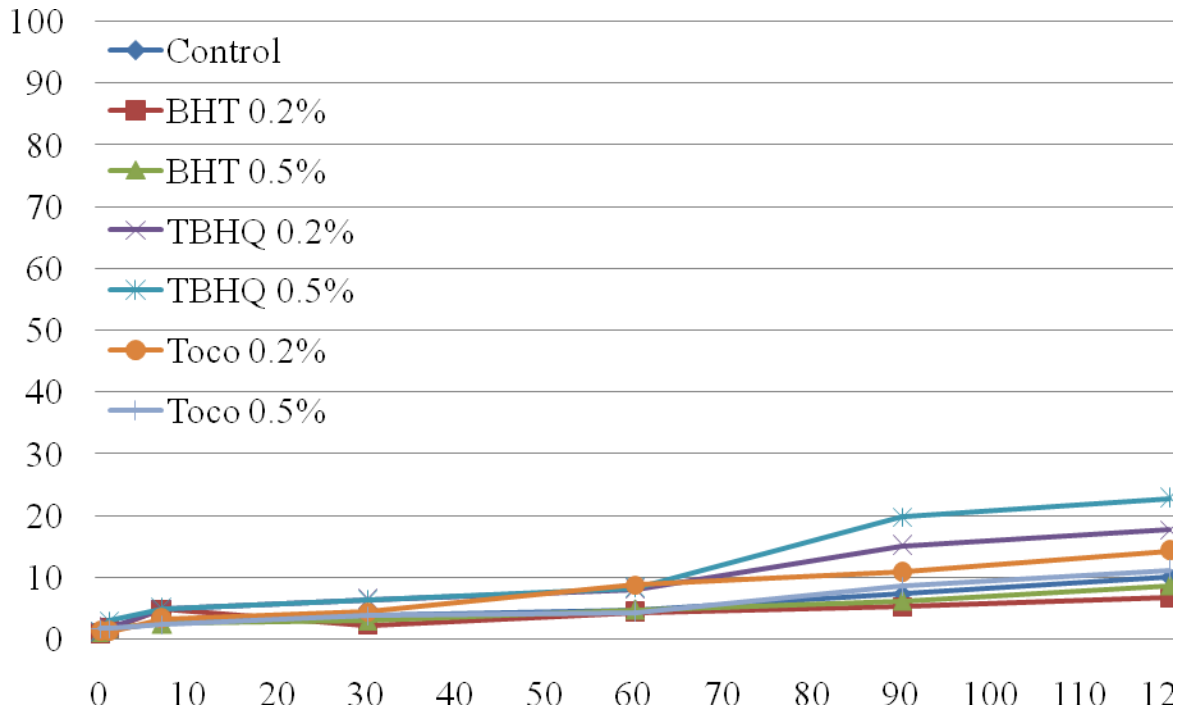


Figura 1. Oxidación del biodiesel de palma almacenado a 24.4 °C y 74.8 %HR

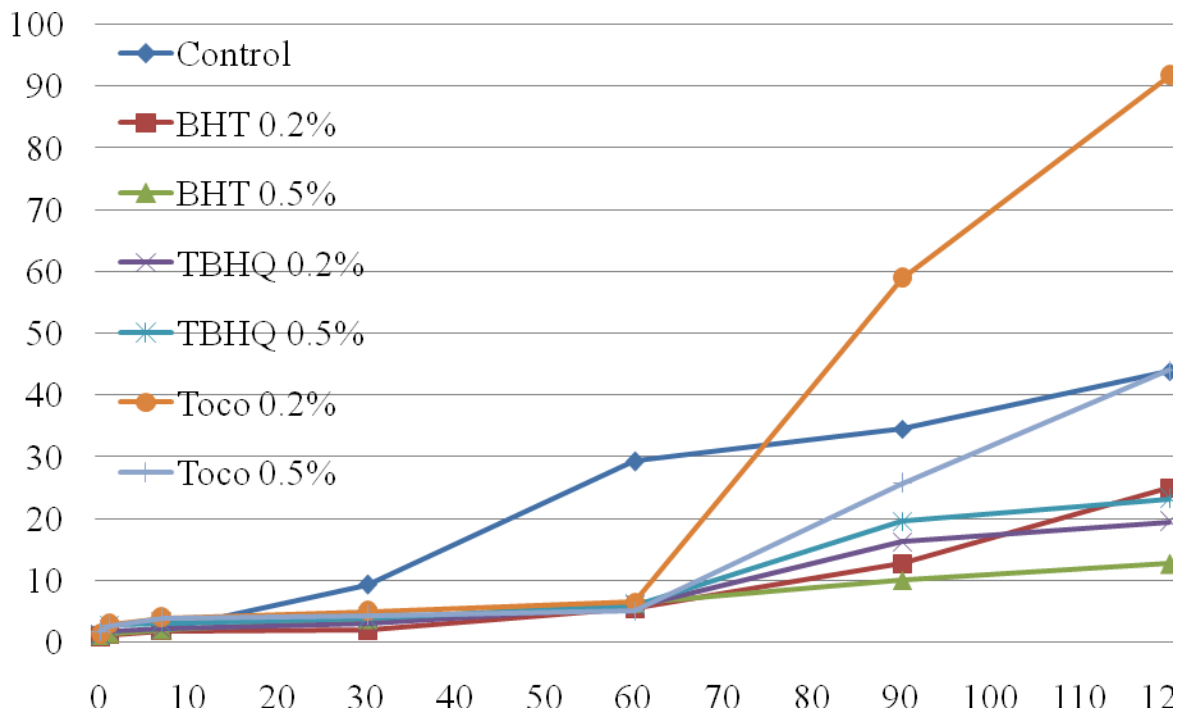


Figura 2. Oxidación del biodiesel de palma almacenado a 39.7 °C y 91.1 %HR

Anexo 12. Oxidación del biodiesel con aceite de maíz en 120 días de almacenamiento.

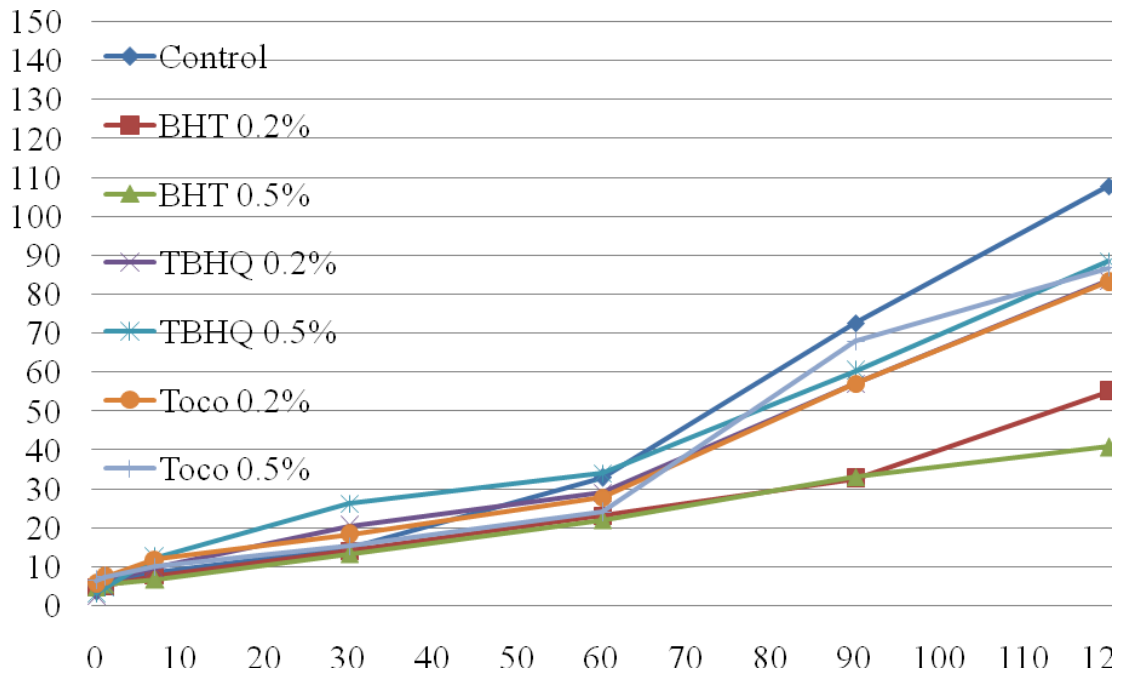


Figura 1. Oxidación del biodiesel de maíz almacenado a 24.4 °C y 74.8 %HR

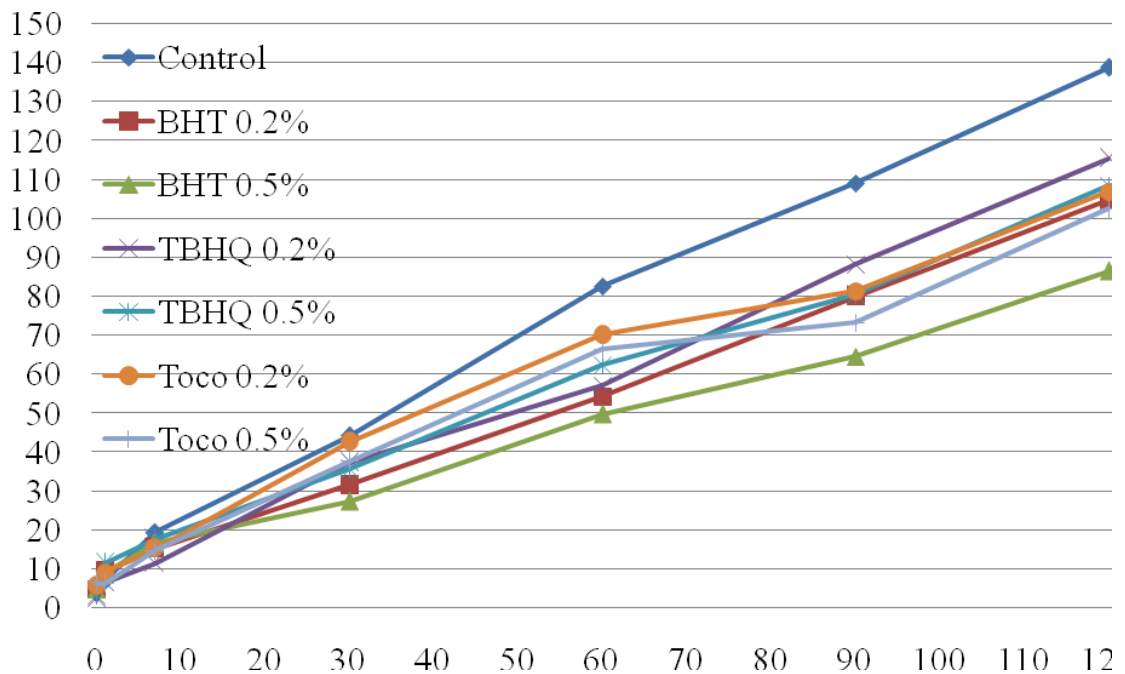


Figura 2. Oxidación del biodiesel de maíz almacenado a 39.7 °C y 91.1 %HR