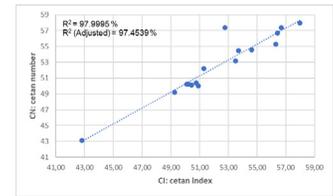


Comparaciones empíricas y correlaciones entre el índice de cetano y las propiedades fisicoquímicas de los combustibles biodiésel



Empirical comparisons and correlations between cetane number and physicochemical properties of biodiesel fuels



Fernando Poblet-Carrillo-de-Albornoz, Pedro Mora-Peris, Juan Pous-de-la-Flor y Marcelo F. Ortega-Romer

Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. de Minas y Energía, Calle ríos Rosas, 21 - 28020 Madrid (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/10955> | Recibido: 12/mar/2023 • Inicio Evaluación: 22/mar/2023 • Aceptado: 26/jun/2023

To cite this article: POBLET-CARRILLO-DE-ALBORNOZ, Fernando; MORA-PERIS, Pedro; POUS-DE-LA-FLOR, Juan; ORTEGA-ROMER, Marcelo. EMPIRICAL COMPARISONS AND CORRELATIONS BETWEEN CETANE NUMBER AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF BIODIESEL FUELS. DYNA. March - Abril 2024, vol. 99, n.2, pp.188-194. DOI: <https://doi.org/10.6036/10955>

FINANCIACIÓN

Este artículo ha sido parcialmente financiado por el proyecto eFriend3D de la convocatoria Hazitek 2019 del Dpto. de Industria del Gobierno Vasco.

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO₂) emissions due to transportation have been increasing since records have been kept, only in recent years there has been a 6 % increase in CO₂ emissions from 2015 to 2019. So, it is a sector in constant increase and where there is much work to do to reduce emissions of this global warming precursor gas. Comparatively, these emissions from biodiesel, obtained from rapeseed oil, with respect to diesel are significantly reduced. In the same sense, and adding an economic component, biodiesel produced from raw materials such as olive oil, olive pomace oil, sunflower oil, soybean seed oil, algae, castor or castor oil, rapeseed, palm, corn, Brassica carinata or Ethiopian rapeseed, and sea buckthorn, shows that it is more competitive in terms of price and environmental protection. An additional advantage of biodiesel over conventional diesel, thanks to its vegetable origin, is that it lacks cyclic chain hydrocarbons and aromatics, so its use in combustion does not produce carbonaceous residues, furans or dioxins. In addition, they produce less carbon monoxide (CO) emissions due to the greater amount of oxygen in biodiesel and sulfur dioxide (SO₂) emissions are almost negligible. On the other hand, their combustion in both small and large engines gives somewhat lower power than with conventional diesel. In this work, analyses of the different properties of biodiesel produced by a total of 24 types of raw material, including blends between them, have been carried out. The main properties of the product have been characterized and found. One of the most remarkable results is that the increase in the cetane number of the samples implies a uniform increase or decrease in the rest of the properties. No significant differences were found between the properties of biodiesel from frying oil residues and those of un-fried or fresh oils, and even those of diesel.

Keywords: biofuels, biodiesel, wastes, sustainable, development, correlations, cetane number, cetane index.

RESUMEN

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), debidas al transporte, han ido en aumento desde que se tienen registros,

sólo en los últimos años se ha producido un incremento del 6 % en las emisiones de CO₂ de 2015 a 2019. Por tanto, es un sector en constante aumento y en el que hay mucho trabajo por hacer para reducir las emisiones de este gas precursor del calentamiento global.

Comparativamente, estas emisiones del biodiésel, obtenido a partir de aceite de colza, respecto al gasóleo se reducen significativamente. En el mismo sentido, y añadiendo un componente económico, el biodiésel producido a partir de materias primas como aceite de oliva, aceite de orujo de oliva, aceite de girasol, aceite de semilla de soja, algas, ricino o aceite de ricino, colza, palma, maíz, Brassica carinata o colza etíope, y espino amarillo, se muestra más competitivo en términos de precio y protección medioambiental. Una ventaja adicional del biodiésel frente al gasóleo convencional, gracias a su origen vegetal, es que carece de hidrocarburos de cadena cíclica y aromáticos, por lo que su uso en la combustión no produce residuos carbonosos, furanos ni dioxinas. Además, producen menos emisiones de monóxido de carbono (CO) debido a la mayor cantidad de oxígeno del biodiésel y las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) son casi inapreciables. En cambio, su combustión en motores pequeños y grandes da una potencia algo menor que con el gasóleo convencional.

En este trabajo, se han analizado las diferentes propiedades del biodiésel producido a partir de un total de 24 tipos de materia prima, incluyendo mezclas entre ellas. Se han caracterizado y hallado las principales del producto.

Uno de los resultados más destacables es que el aumento del índice de cetano de las muestras implica un aumento o disminución uniforme del resto de propiedades. No se encontraron diferencias significativas entre las del biodiésel procedente de residuos de aceites de fritura y las de ellos sin freír o frescos, e incluso las del gasóleo.

1. INTRODUCCIÓN

Los biocarburantes son combustibles derivados de la transformación de la biomasa, según la Directiva (UE) 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes de energía renovables: "la fracción biodegradable de los productos, residuos y desechos de origen biológico procedentes de las actividades agrícolas, incluidas las sustancias de origen vegetal y animal, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas

la pesca y la acuicultura...". Dentro de éstos, están los líquidos que se producen para el transporte [1]. La American Society of Testing Materials (ASTM) define el biodiésel como: "combustible formado por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales" [2], [3]. Es un líquido obtenido a partir de aceites vegetales y grasas animales, con o sin uso previo [4], mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación [2], [5]. Se aplica a una mezcla de ésteres metílicos o etílicos obtenidos a partir de los triglicéridos que constituyen los ácidos grasos de cadena larga, componentes de las grasas vegetales o animales (FAME o FAEE) [6], [7], con el fin de utilizarlos como combustible para un motor diesel o una caldera para la producción de vapor o agua caliente. También puede ser un aditivo para el gasóleo de origen fósil, debido a la similitud de sus propiedades físico-químicas.

1.1. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Algunos investigadores [8] desarrollaron un proceso para fabricar ésteres metílicos a partir de aceites vegetales usados y probaron el biodiésel obtenido en un autobús público, con una reducción de los humos y la turbidez. Ésta es una forma muy prometedora de añadir valor a estos residuos como recurso energético [9]. Entre Indonesia y Taiwán se está investigando y produciendo principalmente a partir de aceite de palma y jatrofa [10]. Otra materia prima ha sido el aceite de orujo de oliva, en dos etapas: transesterificación ácida seguida de la alcalina, con una tasa de conversión del 95 % [11].

El gran aporte de esta investigación es que los productos ensayados fueron obtenidos a partir de aceites vegetales frescos y usados, mediante el proceso básico de transesterificación [12] en el cual los triglicéridos de ácidos grasos [13], reaccionan con un alcohol, en este caso metanol, en presencia de un catalizador (metóxido de sodio) [14], [15], [16], y se transforman en los ésteres metílicos de estos ácidos y glicerol [17].

La producción por lotes de ésteres metílicos puede realizarse en un tanque agitado a baja temperatura mezclando el aceite o la grasa con metanol y utilizando hidróxido de sodio como catalizador [18]. En otras investigaciones se utilizó metóxido sódico como catalizador [19]. B. Freedman, E. H. Pryde y T. L. Mounts [20], desarrollaron la patente de Bradshaw y Mealy para la transesterificación de aceites crudos y refinados, estableciendo las condiciones óptimas para la máxima conversión, distinguiendo entre catálisis ácida y básica. Para la metanólisis del aceite de girasol, el mayor rendimiento se obtiene con metóxido de sodio [21]. El metanol permite que los aceites utilizados no sean refinados, simplemente purificados o filtrados.

1.1. Ventajas del biodiésel

A menudo se denomina B100, cuando es puro y no se mezcla con combustibles procedentes del petróleo; sin embargo, es miscible con el gasóleo procedente del petróleo, lo que permite una mezcla de éstos en cualquier proporción [22].

Contribuye a la reducción de las emisiones atmosféricas de dióxido de carbono, óxidos de azufre, partículas e hidrocarburos totales [23], [24], [25], [26]. El carbono contenido en los aceites procede del CO₂ atmosférico fijado por fotosíntesis. La mayor parte del CO₂ emitido no aumenta su concentración neta en el aire porque el siguiente cultivo de semillas oleaginosas lo reutilizará a medida que crezca [27]. Se producen cetonas y aldehídos equivalentes a los del gasóleo convencional [23]. Sin embargo, produce un aumento de las emisiones de óxidos de nitrógeno, dependiendo de las condiciones de uso en los motores [25], [26], [27], [28], [29], [14], incluso dependen de la densidad, el número

de cetano (CN), la longitud de la cadena de los ésteres y los dobles enlaces de las moléculas [30].

El biodiésel, por su origen vegetal, carece de hidrocarburos de cadena cíclica y aromáticos [15], por lo que su uso en combustión no produce residuos carbonosos, furanos ni dioxinas [6]. Las emisiones de SO₂ son insignificantes [16], [24], [31], [32].

Otras prestaciones ofrecidas son:

- Mayor lubricidad [17], [22] o suavidad, lo que reduce la fricción y prolonga la vida útil del motor.
- Procesos de conversión sencillos. Plantas de producción de diversos tamaños [33].
- El biodiésel emite un 4,7% más de CO₂ que el gasóleo convencional, pero la mayor parte es captada por las plantas durante la fase de crecimiento, por lo que su contribución al efecto invernadero es insignificante [14].
- Mejora del control de calidad, gracias a la norma establecida por la ASTM (American Society for Testing and Materials) [34].
- La sustitución del gasóleo convencional por mezclas con altos niveles de biodiésel (B50 a B100) reduce significativamente las emisiones de partículas [34].
- Durante su combustión no se producen partículas ni hidrocarburos aromáticos policíclicos [16].
- Reutilización de aceites vegetales usados para el desarrollo sostenible.
- Es renovable [14], [33], de baja toxicidad en comparación con el gasóleo y se degrada más rápidamente que éste [15], [22], [33], [35].
- Se puede mezclar fácilmente con el gasóleo en cualquier proporción, con excelentes propiedades lubricantes [35].
- Los aceites de origen vegetal pueden aplicarse con éxito a los motores con índice de cetano (IC) existentes sin grandes modificaciones [15], [35].
- Mejora la combustión gracias a los valores más elevados del índice de cetano [17].
- El biodiésel producido a partir de aceite de cocina usado tiene potencial para mejorar la seguridad energética [17]. La producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados podría reducir los costes de las materias primas.

Desventajas del biodiésel:

- No es apto para su uso a temperaturas muy bajas. La mejor forma de utilizar biodiésel durante los meses más fríos es mezclarlo con combustible diésel apto para el invierno o con aditivos [14].
- Mayores concentraciones de óxidos de nitrógeno en los gases de escape [25], [26], [27], [28], [29], [31].
- Menor capacidad energética. El biodiésel proporciona menos potencia que el diésel convencional.
- Mayor degradación que el gasóleo. El problema surge del almacenamiento y depósito del biodiésel, debido a sus características hidrófilas y degradables.
- En general, es más susceptible que el gasóleo convencional a la degradación microbiana [34].
- No es compatible con algunas mangueras, juntas, metales y plásticos [34].
- Puede obstruir los filtros de combustible [35].
- Puede dañar las carcasas de goma de algunos motores.
- Es casi 1,5 veces más caro que el petróleo.

Una buena solución para los aceites de cocina usados es utilizarlos como materia prima para biodiésel [33], [36]

contribuyendo al desarrollo local, con programas de recogida y reciclaje de estos productos [17]. Partir de estas materias primas reduce el coste en comparación con los aceites frescos.

En todo el mundo existe un gran potencial para desarrollar biocombustibles que puedan prepararse a partir de aceites vegetales y grasas animales frescos o usados, fomentando su reciclaje. La contaminación ambiental, el aumento de los precios del petróleo y la autosuficiencia energética han impulsado la investigación de estas fuentes de energía alternativas [37], [38].

1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Demostrar que el biodiésel obtenido a partir de aceites de cocina usados puede ser una alternativa al uso del gasóleo, de origen petrolífero, para determinados medios de transporte y en sistemas de calefacción. Con el aliciente de que muchas de sus propiedades físico-químicas lo hacen apto para motores de combustión. Además, se demuestra que estos productos pueden utilizarse como materia prima para biocombustibles en lugar de aceites vegetales frescos.

En esta investigación se analizaron las propiedades fisicoquímicas del biodiésel, obtenido como mezclas de ésteres metílicos, preparadas a partir de aceites vegetales comerciales, tanto frescos como utilizados en procesos de fritura de alimentos:

- Aceites de oliva virgen frescos y usados.
- Aceites de orujo de oliva frescos y usados.
- Mezclas de aceites de oliva y girasol frescos y usados.
- Mezclas de aceites de oliva, girasol y orujo frescos y usados.
- Mezcla de aceites de palma, girasol, soja y girasol ricos en oleico, usados.
- Aceites de maíz frescos y usados.
- Aceites de girasol frescos y usados.
- Aceites de soja frescos y usados.
- Aceite de linaza fresco.
- Aceite de cacahuete fresco.
- Aceite de colza fresco

Posteriormente, se sometieron a una serie de experimentos de laboratorio con instrumentos y equipos normalizados (normas ASTM y otras), idénticos a los que se sometieron los gasóleos de origen fósil.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL POR TRANSESTERIFICACIÓN

La reacción de transesterificación entre los aceites y el alcohol metílico [39] se llevó a cabo en un reactor de tanque calentado, por calentamiento envolvente, y agitado, lo que permitió la homogeneización de la mezcla aceite - metanol y un mayor control de la temperatura.

En un depósito esférico de 100 cm³ de capacidad, cerrado por la parte superior mediante una tapa con tres bocas, y equipado con: un agitador mecánico, un termómetro y un refrigerante (cubierto por un tubo con lana mineral, para evitar que entre la humedad ambiental), se introduce el aceite con el metanol. La mezcla se calienta mediante una manta calefactora y se agita mediante un imán hasta alcanzar los 60 °C, momento en el que se añade metóxido sódico como catalizador, elevando la temperatura a 63,3 °C durante un minuto, haciendo que la mezcla de reacción sea menos turbia. La mayor conversión (94 %) se obtiene en

aproximadamente una hora. Otros trabajos se realizaron utilizando hidróxido potásico como catalizador [40].

Se utiliza un evaporador rotativo para eliminar el exceso de metanol de los productos de reacción, tanto el biodiésel como la glicerina.

2.2. ANÁLISIS REALIZADOS

2.2.1. Densidad

Está vinculada a la composición de los combustibles y a su curva de destilación. Un valor muy alto implica una temperatura final de destilación elevada, pero se obtendría una mayor cantidad de energía por unidad de volumen.

Se determinó a 15 °C utilizando el densímetro digital (Density Meter DMA 48), según el método de ensayo ASTM D4052 e IP 365.

2.2.2. Viscosidad

Dos tipos: cinemática y dinámica. El primero se obtiene, casi directamente, por ensayo, siguiendo las normas ASTM D 445, ASTM D 446, API 71 y UNE 51108. Para la segunda, es necesario determinar también la densidad del líquido. Para la viscosidad cinemática se utilizaron viscosímetros capilares de vidrio calibrados en forma de "U" del tipo Cannon-Fenske para líquidos opacos.

2.2.3. Puntos de inflamación y combustión

Estos ensayos se realizaron de acuerdo con las siguientes normas: ASTM D 92-85, IP 36/84 y UNE 51022-90. Se utilizó un aparato automatizado "Cleveland Open Cup Test". Cuando la presión difiere de 760 mm Hg, se deben corregir las temperaturas de ignición y combustión. La corrección se realizó según el método especificado en ASTM D 92 y NLT - 127.

2.2.4. Puntos de vertido y de nube

Ambas temperaturas se determinan con el mismo equipo. Se utilizó la norma ASTM D 97 para la temperatura límite de vertido y la ASTM D 2500 para la temperatura de nebulización. Estos análisis se realizaron en un equipo automatizado A.T.P.E.M., cuyo funcionamiento es conforme a las normas ASTM D 97, D 2500 y NFT 60 - 105.

2.2.5. Índice de refracción

Se utilizó la norma ASTM D1218, válida para hidrocarburos de color claro a temperaturas comprendidas entre 20 °C y 30 °C.

2.2.6. Índice de yodo

El índice de yodo es la cantidad de halógeno en gramos, expresada en yodo, que reacciona con 100 g de muestra en condiciones específicas. La determinación del índice de yodo se llevó a cabo con arreglo a la norma británica IP 84. Este método se conoce como el del "monocloruro de yodo".

2.2.7. Punto de obstrucción del filtro en frío (CFPP)

Los análisis se han realizado según las normas IP 309, UNE 51117 y EN 116.

2.2.8. Calor de combustión

Es el calor de reacción obtenido de su oxidación con el oxígeno molecular. Resulta de la combustión de un mol de la sustancia en su estado normal a 25 °C y 1 atm. El contenido de carbono (C) de los combustibles está relacionado con su poder calorífico. En el biodiésel, las cadenas de C se sitúan en el intervalo de C12 a C22, lo que resulta inferior al del gasóleo. Sin embargo, tienen un NC más elevado [41].

Sustancias	Número cetano (NC)	Densidad (d) (g/cm ³)	Viscosidad (v) (cSt)	PCS (cal/g)	Punto de inflamación (flashp) (°C)	Punto límite de vertido (pourlimp) (°C)	Punto de nube (Cloudp) (°C)	Punto de obstrucción de filtro frío (CFPP) (°C)	Número de yodo (ny)	Índice de refracción (ir)	H (%)
B. cacahuete (f)	54,6	0,8797	4,5979	9488,1	183,0	11,0	14,5	12	90	1,4517	12,66
B. colza (f)	57,4	0,8844	4,6720	9470,0	183,5	-12,5	-4,0	-10 ⁽¹⁾	108	1,4549	12,13
B. linaza (f)	43,1	0,8942	3,8612	9474,2	181,5	-7,5	-7,0	-11	175	1,4635	11,73
B. girasol (f)	52,2	0,8844	4,2472	9494,4	184,5	-3,0	2,0	-4	128	1,4567	12,59
B. girasol (u)	49,2	0,8873	4,5148	9467,1	183,0	-3,0	1,5	-2	119	1,4560	12,24
B. maíz (f)	50,4	0,8853	4,2242	9506,3	185,0	-5,0	-5,0	-7	125	1,4559	12,23
B. maíz (u)	50,0	0,8853	4,2517	9518,5	180,0	-4,0	-3,0	-8	133	1,4558	12,59
B. soja (f)	50,1	0,8851	4,0813	9581,5	185,3	-0,5	-1,0	-5	120	1,4575	11,74
B. soja (u)	50,2	0,8855	4,0939	9458,8	182,5	0,0	0,0	-5	135	1,4560	12,63
B. orujo aceituna (f)	57,4	0,8793	4,8091	9566,9	183,5	-3,0	-3,5	-2	84	1,4517	12,23
B. orujo aceituna (u)	55,3	0,8799	4,8698	9536,7	180,0	-3,0	-2,0	-2	89	1,4515	13,01
B. oliva virgen (f)	58,0	0,8777	4,5880	9541,7	183,5	-3,5	-3,5	-7	81	1,4505	12,71
B. oliva (u)	56,7	0,8800	4,8411	9590,1	181,5	-2,0	-2,0	-5	81	1,4520	12,47
B. olgíoo (u)*	50,2	0,8855	4,0939	9458,8	182,5	0,0	0,5	-6	97	1,4560	12,35
B. plgisjolv (u)**	53,2	0,8820	4,3652	9494,0	183,5	1,0	2,0	-3	106	1,4517	12,10
B. olgi (u)***	54,5	0,8823	4,4544	9536,1	183,7	-0,5	1,0	-6	101	1,4548	12,01

(f): se refiere al aceite fresco.
(u): se refiere al aceite usado, tras los procesos de fritura (residual).
* Corresponde a una mezcla de aceites usados de oliva, girasol y orujo de oliva.
** Corresponde a una mezcla de aceites usados de palma, girasol, soja y girasol ricos en oleico.
*** Corresponde a una mezcla de aceites usados de oliva y girasol.
(1) Resultado no empírico propio, obtenido de la literatura [46].

Table 1. Resultados de las pruebas realizadas con biodiésel, como base de las correlaciones obtenidas (Elaboración propia)

La prueba para determinar el poder calorífico superior (PCS) se realiza según lo especificado en la norma ASTM D 240, éste se obtiene directamente, registrado a partir de las observaciones de la variación de temperatura durante la combustión. El poder calorífico inferior (PCI) se deduce por el calor latente de condensación, expresado en porcentaje de hidrógeno, según la expresión citada en la norma: $PCI = PCS - (\% H)$

El equipo utilizado es un calorímetro adiabático automatizado, fabricado por LECO, que requiere un sistema de suministro de oxígeno.

2.2.9. Número de cetano

El número de cetano (NC) es una medida de la capacidad de ignición de un combustible cuando se comprime en presencia de oxígeno. El combustible debe tener una estructura química que favorezca la autoignición. El hidrocarburo estándar utilizado para evaluar esta propiedad es el cetano o n-hexadecano (C₁₆H₃₄), al que se asigna un NC de 100 (se enciende muy rápidamente) [42], [43]. En el otro extremo se encuentra el -metilnaftaleno, un hidrocarburo muy poco inflamable, al que se le asigna un NC de cero. Se han desarrollado otros modelos matemáticos semiempíricos del funcionamiento de los motores [44].

La medición estándar del NC se realiza en un motor normalizado según ASTM D613 e IP 41, también válido ISO 5165, construido por Cooperative Fuel Research (C.F.R.), por la empresa americana Waukeesa.

El motor de prueba tiene compresión variable. Se varía hasta que el encendido se produce en el punto muerto superior, con un cierto grado de avance de la inyección. La relación de compresión está relacionada con el NC.

Aunque fue posible llevar a cabo esta prueba con aceites vegetales, el rendimiento de estos productos en la relación de compresión del motor a escala real no era totalmente compatible.

Por lo tanto, las pruebas se realizaron para la determinación del NC por partes:

- 1) Utilizando únicamente gasóleo (combustible de referencia).
- 2) Con mezclas de biodiésel al 30 % y al 50.

El NC se determinó por extrapolación, estimando el punto de corte de la curva que une los puntos obtenidos previamente con el eje del NC en el punto de riqueza del biodiésel al 100 %.

Todos los biodiesel preparados en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid, durante el desarrollo de este trabajo de investigación, fueron ensayados por el INTA en un motor normalizado, de forma que se dispuso de resultados reales para la elaboración de las correlaciones que estiman el NC.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como el proceso para la determinación real del NC mediante el motor de ensayo normalizado es complejo, se han desarrollado otros métodos experimentales para estimarlo, mediante lo que se denomina "Índice de Cetano" (IC), a partir de sus características químico-físicas.

En este trabajo, las correlaciones se han obtenido mediante análisis de regresión, utilizando el método de estimación por mínimos cuadrados. Gráficamente, se trata de obtener la recta más próxima a todos los puntos, minimizando la suma de las distancias de cada uno a ella. El ajuste del modelo general, recta de regresión, a la nube de puntos, se mide por el coeficiente de determinación o correlación (R²), que debe ser lo más alto posible (100 %).

Para determinar las correlaciones se utilizó el programa informático STATGRAPHICS [39]. Los datos se introdujeron en él de acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio.

Se obtiene una lista de posibles regresiones, a partir de los valores más altos del coeficiente de correlación (R^2) y los valores más bajos de C_p (nivel de confianza en la regresión) del estadístico de Mallow [45].

3.1. CORRELACIONES EMPÍRICAS ENTRE EL ÍNDICE DE CETANO (IC) Y LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS ANALIZADAS

Análisis multivariante. Todas las expresiones obtenidas ofrecían una relación de confianza del 99% entre las variables.

Correlación IC frente a d , v , PCS, ir , CFPP, %H, se muestra en la figura 1. Relaciona el índice de cetano (IC) con la densidad (d), la viscosidad (v), el poder calorífico superior (PCS), el índice de refracción (ir), el punto de obstrucción de filtro frío (CFPP) y el contenido de hidrógeno (%H).

$$IC = 546,19 - 1404,32*d + 4,44357*v - 0,0185253*PCS + 633,06*ir - 0,132698*CFPP - 1,44005*%H$$

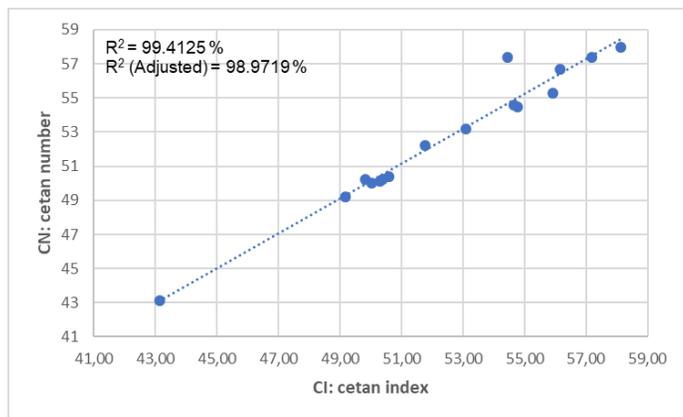


Figura 1. Correlación IC vs. d , v , PCS, ir , CFPP, %H

Correlación IC frente a d , v , flashp, CFPP, se muestra en la figura 2. Relaciona el índice de cetano (IC) con la densidad (d), la viscosidad (v), el punto de inflamación (flashp) y el punto de obstrucción de filtro frío (CFPP).

$$IC = 704,816 - 795,347*d + 3,04159*v + 0,1996*flashp - 0,0993517*CFPP$$

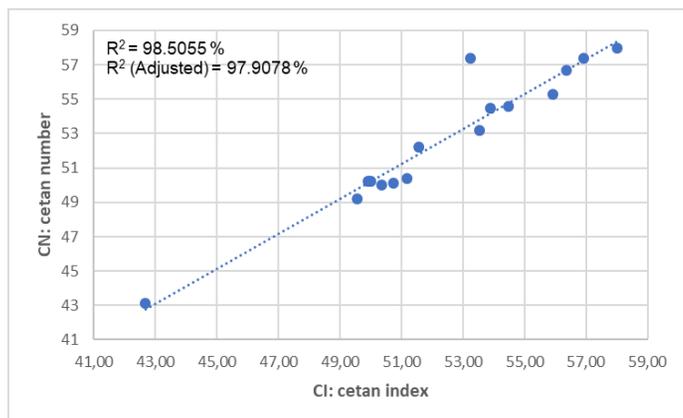


Figura 2. Correlación IC vs. d , v , flashp, CFPP

Correlación IC frente a d , v , PCS, ir , pourlimp, %H, se muestra en la figura 3. Relaciona el índice de cetano (CI) con la densidad (d), la viscosidad (v), el poder calorífico superior (PCS), el índice de refracción (ir), el punto límite de fluidez (pourlimp) y el contenido de hidrógeno (%H):

$$IC = 646,862 - 1398,07*d + 2,92579*v - 0,0157742*PCS + 547,355*ir - 0,141867* pourlimp - 1,49667*%H$$

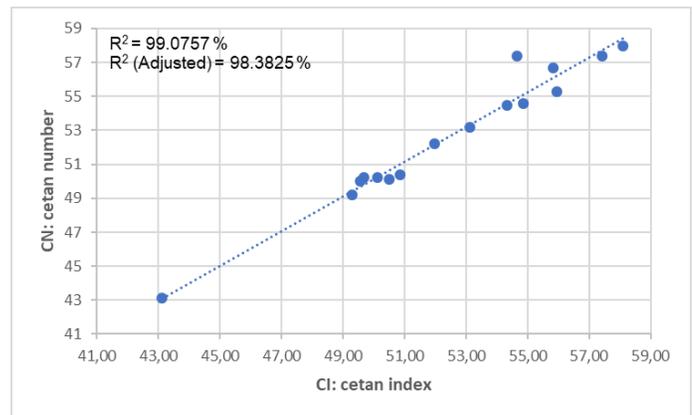


Figura 3. Correlación IC vs. d , v , PCS, ir , pourlimp, %H

Correlación IC frente a d , v , CFPP, se muestra en la figura 4. Relaciona el índice de cetano (IC) con la densidad (d), la viscosidad (v) y el punto de obstrucción en filtro frío (CFPP):

$$IC = 789,474 - 845,575*d + 2,19041*v - 0,0899412*CFPP$$

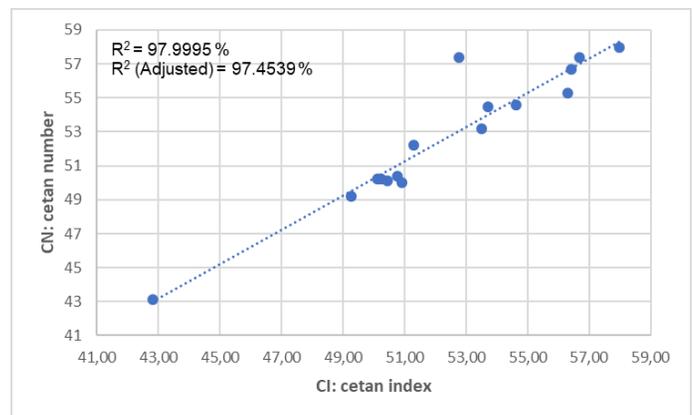


Figura 4. Correlación IC vs. d , v , CFPP

Correlación IC frente a d , pourlimp, se muestra en la figura 5. Relaciona el índice de cetano (IC) con la densidad (d) y el punto límite de vertido (pourlimp):

$$IC = 913,369 - 974,697*d - 0,117729* pourlimp$$

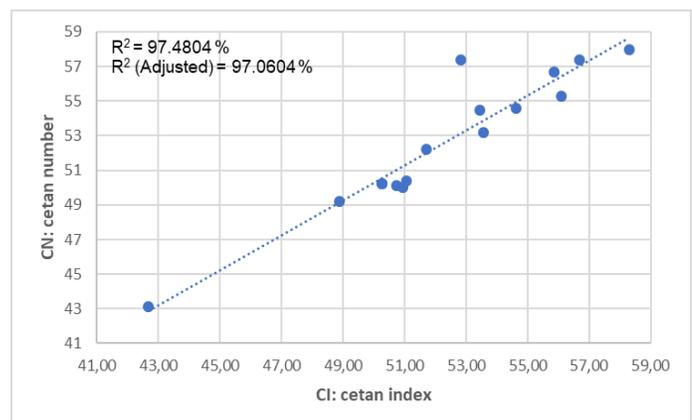


Figura 5. Correlación IC vs. d , pourlimp

- Correlación IC frente a d, Cloudp, se muestra en la figura 6. Relaciona el índice de cetano (IC) con la densidad (d) y el punto de turbidez o niebla (Cloudp):
 $IC = 895,58 - 954,391*d - 0,0769146*Cloudp$

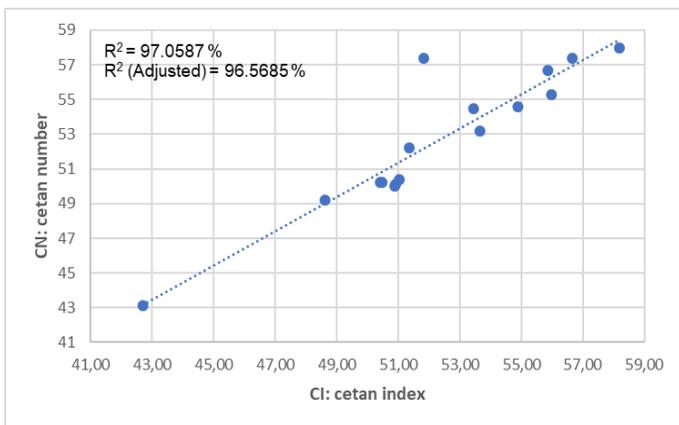


Figura 6. Correlación IC vs. d, Cloudp

- Correlación IC frente a d, se muestra en la figura 7. Relaciona el índice de cetano (IC) con la densidad (d):
 $IC = 869,664 - 925,028*d$

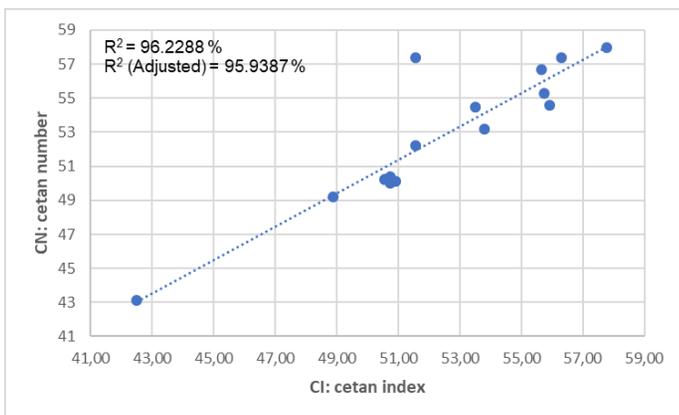


Figura 7. Correlación IC vs. d

- Correlación IC frente a ny, se muestra en la figura 8. Relaciona el índice de cetano (IC) con el número de yodo (ny):
 $IC = 67,5948 - 0,137514*ny$

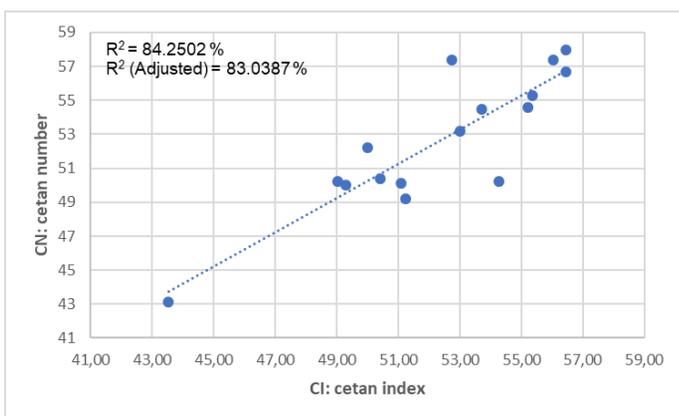


Figura 8. Correlación IC vs. ny

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El resultado más bajo en número de cetano, así como las mayores diferencias en sus propiedades fisicoquímicas, correspondieron al biodiésel de aceite de linaza. Al no ser un aceite apto para cocinar y oxidarse fácilmente cuando está fresco, podría descartarse de la base de datos siendo posible que las correlaciones mejorasen.

La diferencia de densidad entre el biodiésel de aceite usado producido con catalizador fresco o reciclado es insignificante, lo que da lugar a productos análogos y, por tanto, miscibles.

Las propiedades y el rendimiento del biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales usados son análogos a los producidos con aceites frescos, de los que proceden, sólo que debe realizarse un buen proceso de filtrado para eliminar los restos de partículas tras la fritura, antes de la transesterificación. También se observa que el catalizador puede reciclarse para una segunda reacción, reduciendo así los costes de producción. La glicerina obtenida como subproducto también tiene interesantes aplicaciones químicas.

5. CONCLUSIONES

Un aumento en el índice de cetano de las muestras no implica un aumento o disminución uniforme en el resto de propiedades (escasa ortogonalidad de las mismas). Esto se refleja posteriormente en la construcción de los modelos.

La gran similitud de los resultados obtenidos con el biodiésel preparado a partir de aceites de cocina usados respecto a los frescos, e incluso al propio gasóleo, indica el valor de estos residuos como materia prima para la obtención de fuentes de energía alternativas. Ello implica su potencial como recurso energético propio.

Los biodiésel procedentes de aceites de cocina usados presentan al menos una posibilidad como aditivos (mezclas) del gasóleo convencional, especialmente en aplicaciones en las que no se requiere un alto rendimiento.

La mezcla de aceites usados prácticamente no perjudica las propiedades del biodiésel obtenido a partir de ellos, ni su rendimiento. Esto significa que la recogida de estos residuos no tiene por qué ser selectiva.

Las normas de ensayo y análisis utilizadas no se desarrollaron específicamente para los FAME; sin embargo, dadas las similitudes entre las propiedades del gasóleo convencional y los ésteres metílicos de la mayoría de los aceites que se han tratado, excepto en lo que respecta a la volatilidad, se observa que las correlaciones obtenidas darían una estimación adecuada, a falta de un motor de ensayo oficial.

Las investigaciones demuestran que, desde el punto de vista de la valorización de residuos, los aceites de cocina usados pueden ser un recurso para la producción de combustibles, sin modificaciones excesivas en los motores de combustión interna.

La utilización de aceites de cocina usados no aumenta el uso de tierras cultivables. Supone el reciclaje de estos residuos, utilizando un recurso energético autóctono.

Los resultados obtenidos con los biodiésel de aceites vegetales usados son adecuados para estimar su NC a partir de correlaciones empíricas.

REFERENCIAS:

[1] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.
 [2] Paola Fuentes Schweizer, Anayansi Wong Monge. "Determination of fatty acids, free and total glycerol in biodiesel". Centre for Electrochemistry and

- Chemical Energy (CELEQ). University of Costa Rica. San José (Costa Rica). Science and Technology, 31 (2): 52-65, 2015. ISSN: 0378-0524. OAI:portal.ucr.ac.cr/article/25391
- [3] American Society for Testing Materials, "Standard test method for determination of total monoglycerides, total diglycerides, total triglycerides, free and total glycerin in B-100 biodiesel methyl esters by gas chromatography". Designation D6584. United States, 2013
- [4] CIEMAT (2006). "Life cycle analysis of alternative transport fuels. Phase II. Comparative life cycle analysis of biodiesel". Publications Centre. General Technical Secretariat. Ministry of the Environment. Spain. ISBN 84-8320-376-6
- [5] Godlisten G. Kombe, Abraham K. Temu, Hassan M. Rajabu, Godwill D. Mrema, Jibrail Kansedo, Keat Teong Lee. "Pre -treatment of high free fatty acids oils by chemical re - esterification for biodiesel production - a review". *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2013, 3, 242-247. Published online October 2013. DOI: <https://doi.org/10.4236/aces.2013.34031>
- [6] Bacovsky, Dina; Körbitz, Werner; Mittelbach, Martin; Wörgetter, Manfred. "Biodiesel production: technologies and european providers". IEA BIOENERGY Task 39 Liquid Biofuels from biomass. Report T39-86. 6 July 2007. BLT Wiesenburg.
- [7] Ahmad Al-Rousan, Anas Zyadin, Salah Azzam, Mohammed Hiary. "Prospects of synthetic biodiesel production from various bio-wastes in Jordan". *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, Sep. 2013, 3, 217-223. Scientific Research. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2013.33030>
- [8] Thomas B. Reed, Michael S. Grabowski, Siddhartha Gaur. "Biodiesel from waste vegetable oils", from the Department of Chemical Engineering at the Colorado School of Mines (EE.UU.) (1994)
- [9] Shitao Liu, Congping Wu. "A promising way of resource utilization in China: converting waste oils and fats to biodiesel". *Scientific Research. Journal of Power and Engineering*, 2014, 2, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.26001>
- [10] T. W. Chung, Y. J. Chen. "Producing renewable biodiesel fuel using the transesterification process". *Scientific Research. World Journal of Engineering and Technology*, 2015, 3, 105-110. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjet.2015.33C016>
- [11] Antonio Lama - Muñoz, Paloma Álvarez - Mateos, Guillermo Rodríguez - Gutiérrez, María Montaña Durán - Barrantes, Juan Fernández - Bolaños, "Biodiesel production from olive - pomace oil of steam - treated alperujo". *Biomass and Bioenergy* 67 (2014) 443-450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.023>
- [12] L.C. Meher, D.V. Salgar, S.N. Nalk, "Technical aspects of biodiesel production by transesterification: a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 10, nº3, p.p. 248 - 268, July 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- [13] Junzo Otera. "Transesterification". Department of Applied Chemistry, Chayame University of Science. Ridel - Cho. Okayama 700. Japan. Received October 26, 1992. March 15, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr00020a004>
- [14] Gerhard Knothe, Robert O. Dunn, Marvin O. Bagby. "Biodiesel: the use of vegetable oils and their derivatives as alternative diesel fuels". *Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Peoria, IL, 61604*. May 1, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1021/bk-1997-0666.ch010>
- [15] Clever Ketlogetswe, Jerekias Gandure. "Blending cooking oil biodiesel with petroleum diesel: a comparative performance test on a variable CI engine". *Scientific Research. Smart Grid and Renewable Energy*, 2011, 2, 165-168. Published Online May 2011. DOI: <https://doi.org/10.4236/sgre.2011.22019>
- [16] José María Cerveró, José Coca, Susana Luque. "Production of biodiesel from vegetable oils". *Grasas y Aceites*, 59 (1), March 2008. ISSN: 0017-3495. Source: DOAJ. DOI: <https://doi.org/10.3989/gya.2008.v59.i1.494>
- [17] Tiago Almeida Silva, Antonio Carlos Ferreira Batista, Andressa Tironi Vieira, Marcelo Firmino de Oliveira. "A simple method for biodiesel production by the reuse of different types of waste frying oils". *CSCanada. Advances in Petroleum Exploration and Development*. Vol. 5, Nº 2, 2013, pp 83-88. DOI: <https://doi.org/10.3968/j.aped.1925543820130502.907>
- [18] Ján Cvengros, Frantisek Povazanec. "Production and treatment of rapeseed oil methyl esters as alternative fuels for diesel engines". *Bioresource Technology* (Volume 55, Issue 2, February 1996, Pages 145-150). DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00190-5](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00190-5)
- [19] Ayten Sagiroglu, Hakki Mevlut Ozcan, Sebnem Selen Isbilir, Hatice Paluzar, Neslihan M. Toprakkiran. "Alkali catalysis of different vegetable oils for comparisons of their biodiesel productivity". *Scientific Research. Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2013, 3, 79-85. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2013.31011>
- [20] B. Freedman, E.H. Pryde, T.L. Mounts (1984). "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils". *Journal of the American Oil Chemists Society*, 61, 1638 - 1643. U.S. Department of Agriculture, DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02541649>
- [21] Gemma Vicente, Mercedes Martínez, José Aracil. "Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems". *Bioresource Technology*. Volume92, Issue 3, May 2004, Pages 297-305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.08.014>
- [22] Pedro Benjumea, John Agudelo, Andrés Agudelo. "Basic properties of palm oil biodiesel - diesel blends". *ScienceDirect. Fuel* 87 (2008) 2069-2075. 21, December 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.11.004>
- [23] Rui Chen, Zhangcai Qin, Jeongwoo Han, Michael Wang, Farzad Taheripour, Wallace Tyner, Don O'Connor, James Duffield. "Life cycle energy greenhouse gas emission effects of biodiesel in the United States with induced land use change impacts". *Bioresour Technol*. 2018 Mar; 251: 249-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.031>
- [24] Rihab MUSAAD Moawia, Mohamed Mahmoud Nasef, Nor Hasimah Mohamed, Adnan Ripin, Hamdy Farag. "Production of biodiesel from cottonseed oil over aminated flax fibres catalyst: kinetic and thermodynamic behaviour and biodiesel properties". *Scientific Research Publishing. Advances in Chemical Engineering and Science*, 2019 Oct, 9, 281-298. ISSN Online: 2160-0406. DOI: <https://doi.org/10.4236/aces.2019.94021>
- [25] Yongmei Zhang, Hongjun You. "Exhaust emission characteristics of diesel and biodiesel". *Advances in Biological Chemistry*, 2011, 1, 119-121. Published Online November 2011. DOI: <https://doi.org/10.4236/abc.2011.13014>
- [26] B. Ashok, K. Nanthagopal. "Eco - friendly biofuels for CI engine applications". *Advances in Eco - Fuels for a Sustainable Environment*. Woodhead Publishing Series in Energy. 2019. Pages 407-440. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00015-2>
- [27] Jerzy Merksz, Pawel Fuc, Piotr Lijewski and Miloslaw Kozak. Submitted "Rapessed oil methyl esters (RME) as fuel for urban transport". May 21st 2015. Reviewed: January 8th 2016. Published: March 24th 2016. DOI: <https://doi.org/10.5772/62218>
- [28] Laupertia M., Armas O. and Rodríguez-Fernández J. "Effect of biodiesel fuel on diesel engine emissions". *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecc.2007.07.001>
- [29] Assessment and Standards Division, editors. "A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions". Office of Transportation and Air Quality of the US Environmental Protection Agency; 2002. DOI: EPA 420-P-02-001.
- [30] Robert L. McCormick, Michael S. Graboski, Teresa L. Allerman, Andrew M. Herring, K. Shaine Tyson. "Impact of biodiesel source material and chemical structure on emissions of criteria pollutants from a heavy - duty engine". *Environ. Sci. Technol*. 2001, 35, 9, 1742 - 1747. March 30, 2001. Scientific Research. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2013.34037>
- [31] Bjorn S. Santos, Sergio C. Capereda. "A comparative study on the engine performance and exhaust emissions of biodiesel from various vegetable oils and animal fat". *Scientific Research Publishing. Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2015, 5, 89-103. Scientific Research. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2015.53009>
- [32] Bjorn S. Santos, Sergio C. Capereda, Jewel A. Capunitan. "Engine performance and exhaust emissions of peanut oil biodiesel". *Scientific Research. Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2013, 3, 272-286. Scientific Research. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2013.34037>
- [33] Moses Tunde Oladiran, Jerekias Gandure. "Biodiesel for sustainable energy provision in developing countries". *Scientific Research. Low Carbon Economy*, 2011, 2, 138-143. Sep. 2011. DOI: <https://doi.org/10.4236/lce.2011.23017>
- [34] Teresa L. Alleman and Robert L. Mc Cormick. "Biodiesel Handling and Use Guide" (Fifth edition). U.S. Department of Energy. Energy Efficiency & Renewable Energy. NREL/BK-5400-66521; DOE/GO-102016-4875 November 2016. National Renewable Energy Laboratory.
- [35] Srinath Bharath Kumar, Uppinkere Shivaramu Sushma, Laxman Chan Drasagar, V. Bheema Raju, Veena Devi. "Use of waste frying oil as CI engine fuel- A review". *Journal name. Open Access Library Journal*. Vol. 4, nº 11, November 21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1103958>
- [36] B.K. Abdalla, F.O.A. Oshaik. "Base-transesterification process for biodiesel fuel production from spent frying oils". *Agricultural Sciences*. Vol. 4, Nº 9B, 85-88 (2013). DOI: <https://doi.org/10.4236/as.2013.49B015>
- [37] Md Enamul Hoque, Lu Pui Gee. "Biodiesel from plant resources - sustainable solution to ever increasing fuel oil demands". *Journal of Sustainable Bioenergy systems*, 2013, 3, 163-170. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2013.33023>
- [38] C.W. Mohd Noor, M.M. Noor, R.H. Mamat. "Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: a review". *October 2018 Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031>
- [39] J.L. Coronado, A. Corral, P. López, R. Miñano, B. Ruiz, J. Villén: "Applied statistics with STATGRAPHICS". Ed: RA-MA.
- [40] Luis Fernando Bautista, Gemma Vicente, Rosalía Rodríguez, María Pacheco. "Optimisation of FAME production from waste cooking oil for biodiesel use". *ResearchGate. Biomass and Bioenergy*, May 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.01.009>
- [41] Alejandro Torres, Victor H. Castillo Barragán, Raúl Lugo Leyte, Helen Denise Lugo Méndez. "Lower Calorific Value (LCV) of biodiesel from different sources and its performance in the engine". *Conference XXX. National Congress of Thermodynamics*. At: Pachuca, Hidalgo, Mexico. September 2015.
- [42] Hannu Jääskeläinen. "Fuel property testing: ignition quality". *DieselNet Technology Guide*. Revision 2007.27b
- [43] K. Sivaramakrishnan, Paramasivam Ravikumar "Determination of cetane number of biodiesel and its influence on physical properties". *Asian Journal of Applied Sciences* 7(2): 205-211. February 2012.
- [44] Claude Valery Ngayih Abbe, Robert Nezegwa, Raidandi Danwe, Zacharie Merlin Ayissi, Marcel Obounou. "Simulation of a DI diesel engine performance fuelled on biodiesel using a semi-empirical OD Model". *Energy and Power Engineering*, 2013, 5, 596-603. DOI: <https://doi.org/10.4236/epe.2013.510066>
- [45] Mallows C.L.: "Some comments on Cp technometrics". (1973)
- [46] Masjuki Haji Hassau y Mohd Sapnan Sahz, review: "Biofuel as diesel fuel alternative: an overview". *Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Malaya, Kuala Lumpur (Malasia)* (1993).