



## Agroindustrial Science

Agroind Sci 2 (2011)

Escuela de Ingeniería  
Agroindustrial

Universidad Nacional de Trujillo

### Evaluación por el método de superficie de respuesta del efecto de la temperatura y tiempo de transesterificación en el rendimiento y poder calórico del biodiesel obtenido a partir del aceite de piñón (*Jatropha curcas*)

Evaluation of the effect of temperature and time of transesterification on performance and heating power of biodiesel from piñon oil (*Jatropha curcas*) using the response surface method

*Nataly Del Águila, Andrés Mendocilla, Víctor Vásquez\**

*Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.*

Recibido 22 agosto 2011; aceptado 5 octubre 2011

#### RESUMEN

Los objetivos de esta investigación fueron la evaluación por el método de superficie de respuesta del efecto de la temperatura y el tiempo de transesterificación en el rendimiento y poder calórico del biodiesel obtenido a partir de aceite de piñón y la determinación de las mejores condiciones de temperatura y tiempo que permitan obtener el mayor rendimiento y mayor poder calórico de biodiesel. El nivel óptimo de las variables del proceso se determinó mediante un diseño compuesto central rotacional (DCCR), el cual permitió obtener los modelos que definen el comportamiento de las variables de respuesta. Las condiciones óptimas para lograr el máximo rendimiento de biodiesel (85%) se obtuvieron cuando se trabajó a una temperatura de 65 – 75°C y un tiempo de 55 – 70 minutos. Además se evaluaron las propiedades del biodiesel obtenido en las condiciones óptimas con las especificaciones técnicas ASTM D6751 – 07, EN 14214 y NTP 321.003 2005.

**Palabras clave:** Biodiesel, piñón, transesterificación.

#### ABSTRACT

The objectives of this research were to evaluate the effect of temperature and time of transesterification on performance and heating power of biodiesel from oil pinion, and the determination of the best conditions of temperature and time to obtain the highest performance and calorific value of biodiesel increased. The optimal level of process variables was determined using a central composite rotational design (CCRD), which allowed us to obtain the models that define the behavior of the response variables. The optimum conditions for maximum performance of biodiesel (85%) were obtained when working at a temperature of 65-75 ° C and a time of 55-70 minutes. Also, it was evaluated the properties of biodiesel obtained under the optimum conditions with the technical specifications ASTM D6751 - 07, EN 14214 and NTP 321 003 2005.

**Keywords:** Biodiesel, Barbados nut, transesterification.

\* Autor para correspondencia. Tel.: (51) 44 224778; fax: (51) 44 21 4027.  
E-mail: vvasquez@unitru.edu.pe (V. Vásquez).

## 1. Introducción

La necesidad de generar empleo y de gastar menos dinero en combustibles derivados del petróleo y el déficit económico que vive actualmente nuestro país, nos lleva a generar ideas que estén encaminadas a lograr una autosuficiencia en combustibles, bajo esta perspectiva, el biodiesel se presenta como una oportunidad para reemplazar progresivamente parte de la importación de diesel y reducir la contaminación ambiental, generando al mismo tiempo nuevas inversiones, nuevas fuentes de trabajo, nuevas oportunidades de desarrollo agrícola y agroindustrial y promoviendo cultivos alternativos rentables en el país (Castro y Coello, 2007).

Con respecto al estado actual de la tecnología para la producción de biodiesel, se puede decir que se trata de una tecnología probada, relativamente madura, en periodo de diseminación, capaz de aprovechar diversas materias primas y que ha alcanzado nivel comercial en varios países. La mayor parte del biodiesel producido en la actualidad se elabora mediante metanólisis en medio alcalino (Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos, 2007).

El reto para cualquier país o región consiste en la implementación de procesos basados en materias primas autóctonas, los cuales se deben optimizar para obtener un biodiesel con un costo de producción bajo que lo haga competitivo, pero que cumpla con las especificaciones internacionales de calidad para su uso como combustible en motores diesel.

El Perú presenta importantes ventajas para la elaboración de biodiesel ya que en casi la totalidad de su territorio se presenta algún producto agropecuario para la transformación en aceite, además, hay un naciente y creciente entusiasmo con respecto a este combustible existiendo ya iniciativas privadas grandes y pequeñas; sin embargo, la investigación nacional sobre este combustible es limitada, y en general existe aun bastante desconocimiento de aspectos críticos de la

producción de biodiesel que pueden llevar al fracaso de estas primeras iniciativas y generar desconfianza respecto a su uso (Nazario, 2005).

En el presente trabajo se muestra una variante a objeciones que consideran que una masiva e irregular escala de producción de biodiesel podrían destruir el medioambiente y/o afectar la disponibilidad de recursos alimenticios, debido a la controvertida elección entre reemplazar tierras agrícolas para producir biodiesel, o transformar áreas naturales para instalar cultivos energéticos; pues se utiliza como materia prima el piñón, el cual no afecta la disponibilidad de alimentos y proporciona aceites no comestibles, constituyendo una opción prometedora en cuanto a la producción de biodiesel ya que permitirá obtenerlo sin desmedro de la disminución de la extensión de terrenos agrícolas productoras de alimentos por la adaptabilidad de este cultivo a condiciones diversas como las de la costa desértica o la selva tropical lluviosa (Castro y Coello, 2007), generando altos créditos económicos en áreas, que hoy se encuentran totalmente incultas y cuyos valores están totalmente depreciados pues su precio no está influenciado por la competición por el uso alimenticio (Castellanos, 2007).

En esta investigación se presenta un estudio experimental a escala de laboratorio orientado a la optimización de la producción de biodiesel a partir de la metanólisis alcalina del aceite de piñón, con el fin de generar las bases técnicas de la utilización de aceite de piñón en la producción de biodiesel en el Perú, en condiciones en los que los rendimientos de la reacción y el poder calórico del biodiesel no se reduzcan sustancialmente, empleando para ello la optimización para diseños experimentales. Lo cual llevó a plantear el siguiente problema: ¿Cuál será el efecto de la temperatura y tiempo de transesterificación en el rendimiento y poder calórico del biodiesel obtenido a partir del aceite de piñón (*Jatropha curcas*) utilizando el método de superficie de respuesta?

Los objetivos planteados para el presente trabajo fueron:

Evaluar por el método de superficie de respuesta, el efecto de la temperatura (50 - 90 °C) y el tiempo (40 - 90 minutos) de transesterificación en el rendimiento y poder calórico del biodiesel obtenido a partir del aceite de piñón (*Jatropha curcas*).

Determinar las mejores condiciones de temperatura y tiempo de transesterificación que permitan obtener el mayor rendimiento y mayor poder calórico de biodiesel obtenido a partir del aceite de piñón (*Jatropha curcas*).

## 2. Materiales y métodos

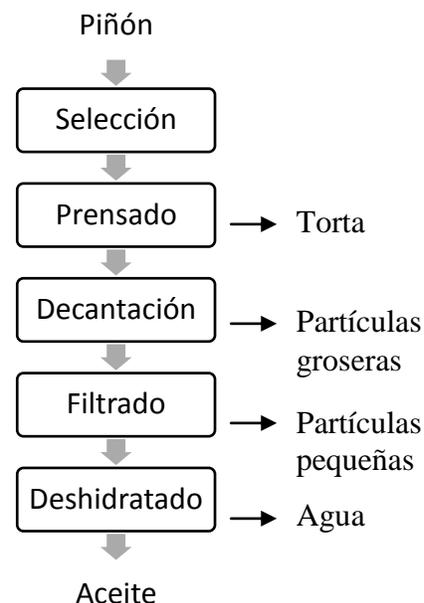
### Obtención del aceite de piñón

Se emplearon semillas de piñón, provenientes de las plantas de desmonte ubicadas en el centro poblado Batán Grande, departamento de Lambayeque, provincia de Ferreñafe, distrito de Pitipo.

Las semillas fueron seleccionadas de forma manual para separar los productos extraños y luego fueron prensadas empleando una prensa de tornillo. El aceite de piñón obtenido se dejó decantar un día, con lo cual sedimentaron las partículas mayores en el fondo del recipiente y fueron separadas posteriormente. Luego de la decantación, se pasó el aceite por un filtro rápido de tela poliéster en el cual quedaron retenidas las partículas pequeñas obteniendo un aceite libre de impurezas. Finalmente el aceite de piñón libre de sólidos, se llevó a la estufa donde se calentó hasta alcanzar los 104°C, Maurtua (2001) indica que a esta temperatura se logra la evaporación del agua contenida en el aceite.

### Selección del catalizador

Se utilizó hidróxido de Potasio (KOH) en escamas al 90% p/p, cuya selección se realizó teniendo en cuenta la teoría fundamentada por Matthys (2003)-citado en Castro y Coello (2007), las conversiones reportadas por Nazario (2005) y su disponibilidad y costo de adquisición en el país.



**Figura 1.** Diagrama de flujo para la obtención de aceite de piñón.

### Selección del éter

Se utilizó alcohol metílico anhidro al 99,88% v/v cuya selección se realizó teniendo en cuenta la teoría fundamental por Genecoo (1999)-citado en Nazario (2005)- y las conversiones reportadas por Araujo (2006) de Albuquerque.

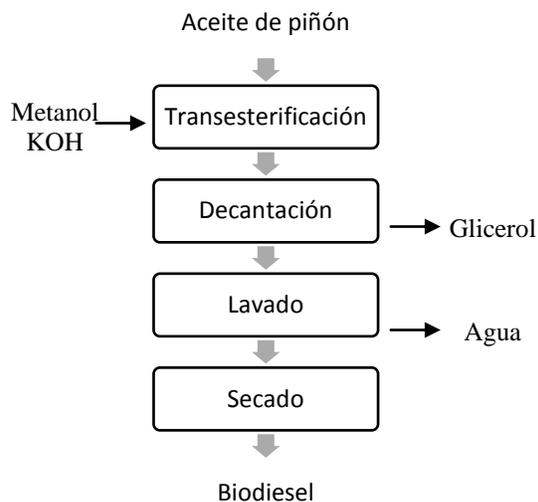
### Obtención de Biodiesel

Se realizaron doce experimentos completos para temperaturas de transesterificación de 50 – 90°C por tiempo de 40 – 90 minutos, en cada experimento se utilizó un volumen de 250 mL de aceite de piñón.

La transesterificación se realizó en una fiola de 100 mL, y consistió en disolver el catalizador sólido en alcohol, se utilizó 1% p/v de hidróxido de potasio (2,5 g) y 20% v/v de metanol (50 mL); cuya mezcla se agitó aproximadamente 5 minutos para lograr su disolución completa. Se realizó la transesterificación propiamente dicha en un reactor de 1,5 L de capacidad donde se mezcló el aceite y el metanol con el catalizador disuelto. La temperatura del reactor se controló por medio de un baño termostatizado

y chaqueta de intercambio con fluido de calentamiento; la temperatura de reacción se controló con un termómetro digital; el medio de reacción se agitó por medio de un agitador mecánico tipo paletas, manteniendo una agitación constante de 820 rpm y el tiempo de reacción se controló con un cronómetro. Al finalizar, se procedió a llevar la mezcla obtenida a decantación durante 2 horas en peras de decantación, obteniéndose dos productos principales: glicerina y biodiesel. El biodiesel obtenido pasó por tres fases de lavado hasta que el agua de lavado se mostró trasparente, por cada litro de biodiesel se usó 1 L de agua destilada.

Una vez terminada la etapa de lavado se procedió a realizar el secado del biodiesel para eliminar agua residual. Esta operación se realizó por calentamiento del biodiesel a 102°C por 5 minutos en una estufa eléctrica Memmert.



**Figura 2.** Proceso de elaboración de biodiesel

#### Caracterización del biodiesel

Para caracterizar el biodiesel, se midió el rendimiento y poder calórico. Para el poder calórico se realizó la metodología descrita por Parr Instrument Company Inc., haciendo uso de la bomba calorimétrica Parr con bomba de oxígeno y su respectiva unidad de ignición y cronómetro.

#### Diseño Estadístico

El diseño utilizado es el Diseño Compuesto Central Rotacional (DCCR) de segundo orden con resultados en Superficie de Respuesta. Se realizó un planeamiento factorial completo  $2^k$ , incluido 2.k puntos axiales y cuatro puntos centrales (en este caso  $k=2$  por ser dos variables independientes) totalizando 12 tratamientos. En la tabla 1 se muestran los niveles de las variables independientes, temperatura y tiempo.

**Tabla 1.** Niveles de los factores estudiados.

Variables	Niveles				
	-1,4142	-1	0	1	1,4142
<b>X1:</b> Temp. °C	50	55,8	70	84,2	90
<b>X2:</b> Tiempo min	40	46,2	65	82,7	90

#### Análisis estadístico

Los datos de las variables respuestas (rendimiento y poder calórico) se analizaron estadísticamente, los análisis realizados fueron:

- Coeficientes de regresión del modelo

$$Y \approx \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2$$

**Donde:**  $\beta_0, \beta_1$  y  $\beta_2$  = Coeficientes de regresión

**Y<sub>1</sub>:** Rendimiento **Y<sub>2</sub>:** Poder calórico

- Análisis de varianza para el modelo
- Superficies de respuesta

#### Validación del modelo matemático

Se realizó dos corridas experimentales con los valores óptimos de las variables de la reacción para comprobar que tan lejos o cerca se encuentran de los valores reales.

### 3. Resultados y discusión

#### Caracterización del aceite de piñón

En la tabla 2 se muestran los principales ácidos grasos del aceite de piñón utilizado en este estudio, ahí muestra y confirma el alto contenido de ésteres de ácidos grasos insaturados en el aceite de la *Jatropha curcas*, componentes que benefician el flujo a bajas temperaturas (Martínez, 2007).

La presencia de curcina en el aceite utilizado en el presente estudio pone en manifiesto su actividad tóxica (no comestible), lo cual permitirá usarlo exclusivamente como materia prima para la elaboración de biodiesel (UNMSM, 1998).

**Tabla 2.** Perfil de ácidos grasos del aceite de piñón (*Jatropha curcas*).

Ácido graso	%
Oleico	41,35
Linoléico	40,88
Palmítico	10,50
Estearico	2,60
Mirístico	0,35
Palmitoleico	0,3-0,4
Curcina	>L.D.*
Ésteres de forbol	n.d.**
Otros	5

Fuente: Laboratorio N° 21 de Investigación y Química Aplicada de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

\*L.D. = 0,01 ppm

\*\*n.d. = no detectable

El índice de acidez presente en el aceite de piñón analizado fue bajo (tabla 3). Según Zhang *et al.* (2003) citado en Castro y Coello (2007) un contenido de ácidos grasos libres superior al 0,5% p/p tienen influencia en la eficiencia del proceso de transesterificación

(menor es la conversión), por lo tanto era muy probable que no se llevara a cabo el proceso de saponificación y se favoreciera en mayor parte la transesterificación del triglicérido, teniendo en cuenta esto, puede decirse que el aceite de piñón analizado reunió los requerimientos necesarios para ser utilizado en el proceso de transesterificación catalizado por álcalis dado que la acidez fue del 1,22 mg KOH/g.

El valor de la viscosidad se obtuvo con el fin de realizar una comparación con el determinado en los ésteres metílicos producidos. Teniendo en cuenta que la viscosidad cinemática del aceite de piñón es 54,8 mm<sup>2</sup>/s, el valor obtenido de la caracterización es un buen parámetro para seguir el curso de la reacción de transesterificación (Torres, 2005).

**Tabla 3.** Acidez y viscosidad cinemática del aceite de piñón (*Jatropha curcas*).

Propiedad	Valor
Acidez	1,22mgKOH/g
Viscosidad cinemática	53,68mm <sup>2</sup> /s

Fuente: Laboratorio de Química-Física de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Trujillo.

#### Pruebas experimentales

La tabla 4 muestra los valores reales y codificados de la temperatura ( $X_1$ ) y tiempo ( $X_2$ ) utilizado en los 12 ensayos con sus respectivas respuestas de rendimiento ( $Y_1$ ) y poder calórico en MJ/Kg ( $Y_2$ ).

**Tabla 4.** Valores codificados de respuestas de rendimiento y poder calórico.

N°	X1 Temperatura (°C)		X2 Tiempo (min)		Y1 Rendimiento (%)	Y2 Poder calórico (MJ/Kg)
	Cód.	Real	Cód.	Real		
	1	-1	55,8	-1		
2	1	84,2	-1	46,2	80,00	39,35
3	-1	55,8	1	82,7	80,33	39,55
4	1	84,2	1	82,7	77,33	39,69
5	-1,41	50	0	65	75,67	38,99
6	1,41	90	0	65	79,33	39,95
7	0	70	-1,41	40	83,00	38,32
8	0	70	1,41	90	81,33	35,93
9	0	70	0	65	86,67	37,49
10	0	70	0	65	88,00	41,22
11	0	70	0	65	86,67	40,23
12	0	70	0	65	85,67	40,28

El rendimiento alcanzó un valor mínimo de 75,67% y un valor máximo de 88,00% en un tiempo de reacción de 65 minutos y a temperaturas de 50°C y 70°C respectivamente. El Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (2007) afirma que los mejores rendimientos de la reacción de transesterificación se dan trabajando en un rango de temperatura de 60 a 75°C; de allí que el mayor rendimiento se dio a temperatura de 75°C.

Freedman (1994)-citado por Nazario (2005)-afirma que la tasa de conversión de triglicéridos a glicerol incrementa con el tiempo de reacción, sin embargo, se puede presentar una posible inversión de la reacción debido a un tiempo de proceso demasiado largo originada por el agotamiento de algunos de los reactantes; de allí que el mayor rendimiento se dio en un tiempo de reacción de 65 minutos.

Por otro lado, el poder calórico (parámetro que indica la cantidad de calor producida por la combustión completa del biodiesel) alcanzó un mínimo de 35,93 MJ/Kg a una temperatura de 70°C y tiempos de reacción de 90 a 65 minutos respectivamente; además se puede apreciar en la tabla 4 que en todos los tratamientos hay una apreciable similitud con

los valores típicos para diferentes tipos de biodiesel reportados por la literatura (aproximadamente 39,542 MJ/Kg) Grabosky (1998 citado en Benjumea y Cano, 2004); según el ITDG y la UNALM (2005) con estos valores de poder calórico alcanzados las muestras de piñón transesterificados se colocarían en la denominación de biodiesel.

#### Análisis estadístico

En la tabla 5 se indica el grado en que cada una de las variables afecta en las respuestas de las variables dependientes. Para el rendimiento, las dos variables independientes cuadráticas aparecen con efecto significativo ( $p < 0,05$ ). Esto indica que las 2 variables independientes cuadráticas en los rangos estudiados tienen efecto significativo sobre el rendimiento, y en un planeamiento o estudio posterior de metanólisis en medio alcalino de piñón estas 2 variables deben ser consideradas. Para el poder calórico las dos variables independientes tanto lineales como cuadráticas aparecen con efecto no significativo.

**Tabla 5.** Estimación de los efectos de las variables para ambas respuestas estudiadas.

	Rendimiento (%)		Poder calórico (MJ/Kg)	
	Efecto	p	Efecto	p
<b>Mean/Interc</b>	86,766	0,000	39,811	0,000
<b>(1) Temperatura(L)</b>	0,131	0,859	0,531	0,674
<b>Temperatura(Q)</b>	-9,241	0,001	0,218	0,875
<b>(2) Tiempo(L)</b>	-1,488	0,119	-0,496	0,697
<b>Tiempo(Q)</b>	-4,775	0,009	-2,270	0,187
<b>1L by 2L</b>	-0,591	0,580	-0,234	0,894

En la tabla 6 se muestran los análisis de los coeficientes de regresión para cada variable de respuesta. Para el rendimiento final, con excepción de la interacción de la temperatura y tiempo de transesterificación, todas las demás fueron significativas ( $p < 0,05$ ); mientras que para el poder calórico todas las variables resultaron significativas.

**Tabla 6.** Coeficientes de regresión para el rendimiento y poder calórico.

	Rendimiento		Poder calórico	
	Coe. Reg.	p	Coe. Reg.	p
Mean/Interc	-58,132	0,025	25,836	0,264
(1) temperatura(L)	32,862	0,001	-0,028	0,951
Temperatura(Q)	-0,023	0,001	0,001	0,856
(2) Tiempo(L)	0,963	0,017	0,457	0,184
Tiempo(Q)	-0,007	0,009	-0,003	0,107
1L by 2L	-0,001	0,580	-0,001	0,877

Los coeficientes de regresión para el rendimiento permitieron elaborar un modelo matemático de segundo orden, donde fueron consideradas sólo las variables significativas y las no significativas, pues aunque según esta metodología la intervención de dichas variables no tienen efecto significativo sobre las respuestas, fue necesaria su adición para ajustar los valores previstos al modelo (tabla 7).

El modelo matemático para la respuesta rendimiento quedó como sigue  

$$Y = -58,1315 + 3,2862X_1 + 0,963X_2 - 0,0229X_1^2 - 0,0072X_2^2 - 0,0011X_1X_2$$

Donde  $X_1$  es temperatura en °C y  $X_2$  es tiempo en minutos.

La tabla 7 presenta los valores experimentales de rendimiento y los valores previstos por el modelo (ecuación anterior).

**Tabla 7.** Valores de rendimiento (%) experimentales, previstos por el modelo y desvíos para el DCCR

Nº	Valor experimental (%)	Valor previsto (%)	Desvío (%)	Desvío relativo (%)
1	81,67	20,22	1,45	1,11
2	80	81,06	-1,06	-1,32
3	80,33	79,26	1,07	1,34
4	77,33	78,95	-1,62	-2,09
5	75,67	77,53	-1,86	-2,46
6	79,33	77,88	1,45	1,83
7	83	83,61	-0,61	-0,74
8	81,33	81,11	0,22	0,27
9	8667	86,86	-0,19	-0,22
10	88	86,86	1,14	1,29
11	86,67	86,86	-0,19	-0,22
12	85,67	86,86	-1,19	-1,39

En la tabla 8 y 9 se muestra el análisis de varianza para las respuestas de rendimiento y poder calórico. Como se observa para la respuesta de rendimiento el modelo es significativo, es decir, el modelo es adecuado para describir los resultados a través de la superficie de respuesta; mientras que para la respuesta de poder calórico la construcción del modelo resultaría no significativo; por lo tanto solo fue posible construir la superficie de respuesta y definir las regiones de interés para el factor de rendimiento.

**Tabla 8.** Análisis de varianza para el rendimiento

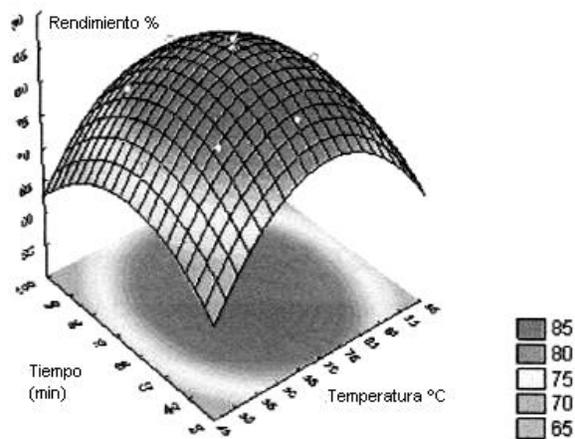
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F cálc.	P
Regresión	2	149,97	74,86	33,35	<0,05
Residuos	9	20,02	2,25		
Total	11	170,21			

**Tabla 9.** Análisis de varianza para el poder calórico.

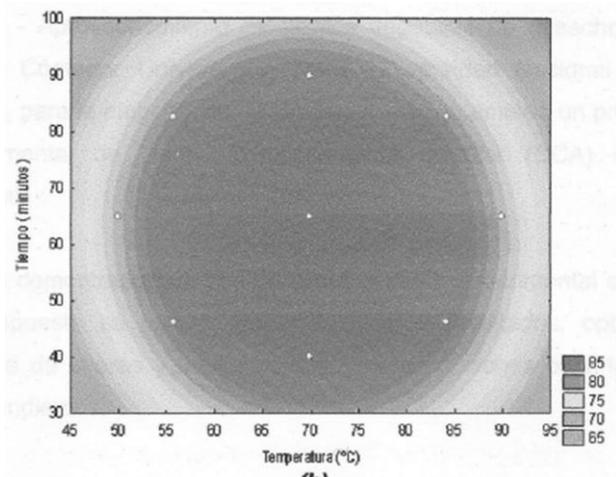
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F cálc.	P
Regresión	0	0,65	Impo.	Impo.	<0,05
Residuos	11	21,24	1,93		
Total	11	21,89			

En la tabla 8 se observa un valor  $p < 0,05$  lo cual indica que es altamente significativa, además el valor del  $R^2 = 90,855\%$  indica que las variables estudiadas y en los niveles establecidos predicen adecuadamente el rendimiento; por lo que se puede afirmar que existe una buena concordancia entre los valores experimentales y los previstos por el modelo.

En la tabla 9, para la respuesta de poder calórico, se observa que el  $R^2 = 42,675\%$  lo cual indica que el modelo para esta respuesta no sería adecuado para predecir el poder calórico. Además de los factores estudiados podrían existir otros factores que influyen en el poder calórico; aún así, este resultado es importante, ya que se puede realizar estudios posteriores incluyendo otros factores que no fueron considerados en este estudio.



**Figura 3.** Superficie de respuesta para el rendimiento en función del tiempo y temperatura.



**Figura 4.** Superficie de contorno para el rendimiento en función del tiempo y temperatura.

El análisis de la superficie de respuesta y curva de contornos permitió definir las condiciones más adecuadas que maximizan el valor del rendimiento. Así en la figura 3 y 4 se verifica que cuando la temperatura de transesterificación está entre 65 -75 °C y el tiempo de transesterificación está entre 65 -75 minutos, el rendimiento alcanza valores mayores a 86,80%.

La superficie de respuesta permitió determinar los parámetros óptimos del proceso, estableciéndose que con una temperatura entre 65 -75 °C y un tiempo de reacción de entre 55 - 70 minutos, se logra el mayor rendimiento en la metanólisis alcalina del aceite de piñón. La organización de Cooperación Técnica Internacional Soluciones Prácticas - ITDG y la Universidad Nacional Agraria La Molina UNALM (2005) obtuvieron biodiesel de piñón (*Jatropha curcas*) con un rendimiento final de 77,86% trabajando con los parámetros óptimos (metanólisis con KOH a una temperatura de 60°C y durante 75 minutos de reacción) de la investigación realizada por Nazario (2005) - Aprovechamiento de aceites vegetales de desechos generados por el Comedor Universitario de la Universidad Agraria La Molina, para la elaboración de Biodiesel- quien empleó un procedimiento

experimental de diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial.

Queda demostrado que con un procedimiento experimental de superficie de respuesta se puede llegar a mejores resultados, optimizando la variable de interés y buscando las mejores opciones para las variables independientes.

#### Validación del modelo

Para validar el modelo matemático se comprobó los valores óptimos para poder saber que tan lejos o cerca se encuentran de los valores reales. Por ello se realizó corridas experimentales teniendo en cuenta los valores establecidos para las variables.

La tabla 10 presenta los valores de rendimiento experimental y previsto en condiciones optimizadas, observándose similitud entre dichos valores.

**Tabla 10.** Valores de rendimiento (%) experimentales y previstos por el modelo con condiciones optimizadas.

Ensayo	Valor experimental (%)	Valor previsto (%)	Desvío (%)	Desvío relativo (%)
65°C a 55min	86,05	85,97	0,08	0,091
75°C a 70min	85,95	85,88	0,07	0,086

#### Caracterización del biodiesel

En la tabla 11 se puede observar que la mayoría de las propiedades del biodiesel obtenido del aceite de piñón están dentro de los rangos especificados por la Norma Estadounidense (ASTM D6751 – 07) y la Norma Europea (EN 14214) para el Biodiesel.

La caracterización del aceite de piñón que se utilizó para el proceso de transesterificación, mostró que la viscosidad inicial del aceite de piñón fue de 53,68 mm<sup>2</sup>/s calificado como altamente viscoso según Castro y Coello (2007), y la viscosidad final luego de la optimización de la metanolisis en medio

alcalino fue de 4,91 mm<sup>2</sup>/s así se puede afirmar que en el proceso de transesterificación el aceite de piñón perdió el 90,4% de su viscosidad inicial; este valor suficientemente reducido asegura que la pulverización y atomización serán adecuados, con lo cual el motor no se verá dañado por formaciones carbonosas excesivas en los inyectores (Castro y Coello, 2007).

Por otro lado, según se desprende de la tabla 11 relativa a las propiedades como combustible, no hay riesgo de corrosión del sistema de alimentación del motor gracias a su bajo índice de acidez y contenido de agua y sedimentos. Además, su manejo y transporte son seguros, avalados por su elevado punto de inflamación - la ASTM estable 130 °C como mínimo y la EN 120 °C como mínimo- (Castro y Coello, 2007).

El índice de acidez bajo, inferior a 0.05 mg KOH/g, valor máximo establecido por la Norma Estadounidense (ASTM D6751 – 07) y la Norma europea (EN 14214), indica la escasa existencia de ácidos grasos libres en el biodiesel de aceite de piñón analizado, característica que refleja una buena calidad del producto y la no degradación por oxidación (Castro y Coello, 2007).

En lo referente a las especificaciones contempladas en la Norma Estadounidense (ASTM D6751 – 07) y la Norma europea (EN 14214) para Biodiesel y la Norma Peruana para Diesel 2 (NTP 321.003 2005); se puede observar que las propiedades de destilación del biodiesel de aceite de piñón en general se encuentran fuera de los límites establecidos en dichas normas.

Los datos de destilación realizados en el biodiesel de aceite de piñón, indican que el intervalo de ebullición es mucho más reducido para el biodiesel que para el diesel corriente. Tal comportamiento refleja el hecho de que los metilésteres producidos a partir de los diferentes ácidos grasos presentes en los triglicéridos no son muy diferentes unos de otros, en oposición a la amplia variedad de hidrocarburos presentes en el diesel de origen fósil (hidrocarburos alcanos normales y

ramificados, cicloalcanos y aromáticos simples y condensados), los cuales pueden poseer volatilidades muy diferentes (Castro y Coello, 2007).

**Tabla 11.** Resultados de las características de biodiesel con las variables optimizadas.

	Características	Valor
<b>Volatilidad</b>	Punto de inflamación (°C)	168
	Gravedad API 15,5 (°C)	36,76
<b>Destilación</b>	Punto inicial de ebullición (°C)	200
	10% recuperación (°C)	250
	50% recuperación (°C)	275
	90% recuperación (°C)	278
	95% recuperación (°C)	270
	Punto final de ebullición (°C)	280
	Recuperado (%vol)	95,5
<b>Fluidez</b>	Residuo (%vol)	4,3
	Pérdida (%vol)	0,2
	Viscosidad cinemática 40°C	4,91
	Densidad 15°C	0,866
<b>Contaminantes</b>	Agua y sedimentos (%vol)	<0,04
	Índice de cetano (%peso)	59,61
	Cenizas (%peso)	<0,01
	Residuo de carbón (%peso)	<0,05
	Índice de acidez (mg KOH/g)	0,349
	Glicerina libre (%peso)	0,011
	Glicerina total (%peso)	0,212

Fuente: laboratorio de Química-Física de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Trujillo

El alto valor de la temperatura del punto inicial de ebullición - superior a 182° C valor establecido por la Norma Peruana para el Diesel 2 (NTP 321.003 2005 y D.S. 041-2005) - es un indicativo de que el biodiesel obtenido posee una pureza aceptable, al no contener cantidades apreciables de metanol ni de agua; asegurando una buena combustión y evitando de esta manera problemas de seguridad en el manejo, transporte y almacenamiento (Querini e IICP, 2006).

Adicionalmente, la obtención de un punto final de ebullición a presión atmosférica es un indicativo de la ausencia en el biodiesel de moléculas de gran tamaño como los mono, di y triglicéridos (Benjumea y Cano, 2004).

El bajo contenido de agua - inferior a 0,05 % volumen del valor máximo establecido por la

ASTM y la EN - indica que se utilizó técnicas adecuadas de secado del biodiesel y no hubo contacto con agua durante su almacenamiento, pues el biodiesel es muy higroscópico y puede absorber agua si es almacenado en contacto con el aire húmedo, o durante las operaciones de carga y descarga, pudiendo ocasionar reacciones de hidrólisis que dan lugar a la aparición de ácidos grasos libres, problemas de corrosión en el motor y crecimiento microbiano que provoca obstrucción de filtros (Querini e IICP, 2006).

El bajo contenido de sedimentos - inferior a 0,05 % volumen valor máximo establecido por la ASTM y la EN - se debe a un buen proceso de purificación del biodiesel, los sedimentos pueden aparecer debido a la oxidación del combustible, así que este análisis, junto con los de acidez y viscosidad ayudaron a establecer que el combustible no se ha oxidado durante su almacenamiento (Querini e IICP, 2006).

En cuanto al alto índice de cetano (tabla 11) - superior a 51 y 40 valor mínimo establecido por la ASTM y Norma Peruana para el Diesel 2 respectivamente (Anexo I-1) - es un indicativo de la excelente calidad de ignición reportada ampliamente para este tipo de biocombustible, este valor indica que el combustible detonará fácilmente cuando sea requerido, mejorará el arranque en frío y la durabilidad del motor y disminuirá los humos blancos de arranque y el nivel de ruido de éste (Querini e IICP, 2006).

El bajo porcentaje de cenizas del biodiesel - inferior a 0.01% valor máximo establecido por la Norma Peruana para el Diesel 2 (Anexo I - 1) - indica la escasa cantidad de materia inorgánica, es decir, escasa cantidad de metales residuales del catalizador usado en el proceso, sólidos abrasivos y jabones metálicos solubles; lo cual favorece al inyector, bomba de inyección, pistón y anillos, además de evitar la formación de depósitos en el motor (Querini e IICP, 2006).

El porcentaje de carbón conradson es uno de los más importantes indicadores de la calidad del biodiesel, correspondiendo estrictamente

al contenido de glicéridos, ácidos grasos libres, jabones, catalizador remanente y otras impurezas; este parámetro da una medida de la tendencia del combustible a depositar carbón en el sistema de inyección, pistón y válvulas Mittcibach (1996, citado en Nazario, 2005); el residuo carbonoso conradson del biodiesel de aceite de piñón caracterizado cumple con las exigencias de la Norma Estadounidense (0,05 % peso como máximo) y la Norma Europea (menor a 0,1% peso) para el Biodiesel, este valor indica que las formaciones carbonosas serán inferiores a las generadas al utilizar gasoil, no requiriendo aumentar la frecuencia de limpieza del interior del motor (Dorado y López, 2005).

#### 4. Conclusiones

La metodología de superficie de respuesta permitió obtener el modelo que define el comportamiento de las variables temperatura y tiempo solo para la respuesta rendimiento, siendo posible construir la superficie de respuesta y definir las regiones de interés sólo para este factor, ya que el modelo fue altamente significativo para esta respuesta y no significativo para la respuesta poder calórico.

A través de la metodología de superficie de respuesta se obtuvieron los niveles óptimos de la temperatura de transesterificación 65 - 75°C y tiempo de transesterificación 55 - 70 minutos, con un rendimiento final de 86.80 % en el biodiesel obtenido a partir de aceite de piñón (*Jatropha curcas*).

Se puede afirmar que utilizando una combinación de 65°C de temperatura y un tiempo 55 minutos, se obtiene esteres metílicos de calidad, pues al comparar las propiedades del biodiesel obtenido con las especificaciones técnicas ASTM D6751 - 07, EN 14214 y NTP 321.003 2005, se determine que el punto de inflamación: 168,0 °C, gravedad API a 15,5°C: 36.76, viscosidad cinemática a 40°C: 4,91 mm<sup>2</sup>/s, densidad a 15°C: 0,846 g/mL agua y sedimentos < 0,04

% volumen, índice de cetano: 49,61, cenizas: < 0,01 % peso, residuo carbonoso: < 0,05% peso, índice de acidez: 0,559 mg KOH/g, glicerina libre: 0,011 % peso y glicerina total: 0,212 % peso, cumplen con lo establecido en dichas normas; sin embargo las propiedades de destilación como el punto inicial de ebullición: 200 °C, punto final de ebullición: 280 °C, 10% recuperado: 250 °C, 50% recuperado: 275 °C, 90% recuperado : 278 °C y 95% recuperado: 270 °C, se encuentran fuera de los límites establecidos en las normas para cada parámetro.

#### 5. Referencias bibliográficas

- Araujo, G. (2006). Obtención y caracterización físico-química de Biodiesel de Canola (*Brassica napus*). Universidad Federal de Paraíba. Centro de Ciencias Exactas y Naturaleza. Departamento de Química. Programa de Post-Grado en Química. Paraíba, Brasil Disponible en: [http://www.ufpb.br/~qca/revistas/revista\\_01/01\\_02\\_06.pdf](http://www.ufpb.br/~qca/revistas/revista_01/01_02_06.pdf) (Accesado 13/10/2007)
- Benjumea, P. y Cano, G. (2004). Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Disponible en: [www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/16190169-174.pdf](http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/16190169-174.pdf) (Accesado 15/05/2008)
- Castellanos, J. (2007). Biodiesel del aceite de planta de piñón de leche o piñoncillo. Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires Argentina, Facultad Regional Avellaneda. Disponible en: [http://www.ergomix.com/distribucion\\_potencial\\_cultivo\\_pinon\\_s\\_articulos\\_1221\\_AGR.htm](http://www.ergomix.com/distribucion_potencial_cultivo_pinon_s_articulos_1221_AGR.htm) (Accesado 20/10/2007)
- Castro, M., Sevilla, S. y Coello, J. (2007). Estudio sobre la situación de los biocombustibles en el Perú. Preparado por Soluciones Prácticas - ITDG para Oxfam Internacional. Encontrado en : [http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:Cz8b133CLAgJ:scholar.google.com/++desarrollo+agr%C3%ADcola+y+agroindustrial+y+promoviendo+cultivos+alternativos+rentables+en+el+pa%C3%ADs+\(Castro+y+Coello,+2007\).&hl=en&as\\_sdt=0,5&as\\_vis=1](http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:Cz8b133CLAgJ:scholar.google.com/++desarrollo+agr%C3%ADcola+y+agroindustrial+y+promoviendo+cultivos+alternativos+rentables+en+el+pa%C3%ADs+(Castro+y+Coello,+2007).&hl=en&as_sdt=0,5&as_vis=1)
- Dorado, M. y López, F. (2005). Proceso de elaboración de un combustible para motores Diesel procedente de ésteres metílicos de aceite de *Brassica carinata* sin ácido erúico. Universidad de Jaén y Universidad de Córdoba, España. Disponible en: [http://www.ujaen.es/~quimica/revistas/revista\\_01/01\\_02\\_05.pdf](http://www.ujaen.es/~quimica/revistas/revista_01/01_02_05.pdf)

[www.ujaen.es/serv/vicinv/nuevo2/Patente\\_ProcesoElaboracionBiocombust.pdf](http://www.ujaen.es/serv/vicinv/nuevo2/Patente_ProcesoElaboracionBiocombust.pdf) (Accesado 15/05/2008)

Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos. (2007). Adecuación tecnológica de la obtención de biodiesel. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. Disponible en: [http://www.pncc.gob.bo/esp/pqpnc/primera%20convocatoria/umsa\\_iideproq/doc%20biodiesel:umsa\\_iideproq\\_pncc.pdf](http://www.pncc.gob.bo/esp/pqpnc/primera%20convocatoria/umsa_iideproq/doc%20biodiesel:umsa_iideproq_pncc.pdf) (Accesado 16/05/2008)

Nazario, M. (2005). Aprovechamiento de aceites vegetales de desecho generados por el Comedor Universitario de la Universidad Nacional Agraria de la Molina, para la elaboración de Biodiesel. Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología, Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ciencias. Programa de Post-Grado. Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología. Lima, Perú.

Querini, C e Instituto de Investigación en Catálisis y Petroquímica (IICP). (2006). Biodiesel: producción y Control de calidad. Disponible en: [www.faceaucentral.cl/pdf/ft\\_fatrophapdf](http://www.faceaucentral.cl/pdf/ft_fatrophapdf) (Accesado 26/10/2008)

Torres, A. (2005). Ficha Técnica de la *Jatropha curcas* Cultivos energéticos. Disponible en: [www.faceaucentral.cl/pdf/ft\\_fatrophapdf](http://www.faceaucentral.cl/pdf/ft_fatrophapdf) (Accesado 15/05/2008)

Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM. 1998. Catálogo de plantas medicinales estudiadas en la Facultades de Farmacia y bioquímica de la UNMSM.

Zingg, A. (2004). Evaluación de la potencia, torque, consumo de combustible y emisión de particulados en un motor empleando petróleo diesel y biodiesel. Tesis para optar el grado de Magíster en Ciencias Ambientales, Universidad Nacional Agraria La Molina. Escuela de Post-Grado especialización en Ciencias Ambientales. Lima, Perú.

