



Universidad Agraria de La Habana
"Fructuoso Rodríguez Pérez"
Centro de Mecanización Agropecuaria
Facultad de Ciencias - Técnicas
Departamento de Matemática - Física

Superficies de respuesta en la evaluación del funcionamiento óptimo del motor de combustión interna al emplear mezclas diésel-etanol

Autor: Lic. Alejandro Ruiz González.

Tesis presentada en opción al título de Máster en Biomatemática

Mayabeque, 2019



Universidad Agraria de La Habana
"Fructuoso Rodríguez Pérez"
Centro de Mecanización Agropecuaria
Facultad de Ciencias - Técnicas
Departamento de Matemática - Física

Superficies de respuesta en la evaluación del funcionamiento óptimo del motor de combustión interna al emplear mezclas diésel-etanol

Autor: Lic. Alejandro Ruiz González.
Tutores: Dra. C. Caridad Walkiria Guerra Bustillo.
Dr. C. Yanoy Morejón Mesa.

Tesis presentada en opción al título de Máster en Biomatemática

Mayabeque, 2019

*“Es increíble que la Matemática,
habiendo sido creada por la mente humana,
logre describir la naturaleza con tanta
precisión.”*

Albert Einstein

Agradecimientos

Ante todo expreso mi más sincero e infinito agradecimiento a mi tutora Dra. C. Caridad Walkiria Guerra Bustillo.

Agradezco a:

- *Mi otro tutor Dr. C. Yanoy Morejón Mesa (gracias infinitas).*
- *Mis padres y mi hermanita.*
- *Mi prima Maday Machado Aquiar.*
- *Magaly Herrera Villafranca.*
- *Lucia Fernández Chuairey.*
- *Los compañeros del Departamento de Matemática - Física de la UNAH, especialmente a Zulema Lombillo Laferté y Noslén Rodríguez Álvarez.*
- *Todo el claustro de la maestría.*
- *Marisela López Acosta.*
- *Mis compañeros del Departamento de Biomatemática del ICA.*
- *Mis compañeros de la maestría.*

Dedicatoria

A mi madre

A mi padre

A mi hermanita

A la memoria de mi abuelita materna 'la vieja'

A la memoria de mi abuelo materno 'abuelo'

A la memoria de mi abuelo paterno

A mi abuela paterna 'mima'

A mi tía 'tía Margot'

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo general establecer criterios estadístico-matemáticos para la determinación de las condiciones óptimas de operación de motores de combustión interna al emplearse mezclas diésel-etanol. El experimento se desarrolló en el Laboratorio de Motores de la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad Agraria de La Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez" (UNAH), en febrero de 2017. Se analizó el comportamiento de las variables momento torsor, coeficiente de adaptabilidad, gasto específico de combustible, consumo horario de combustible y potencia efectiva del motor en función de la frecuencia de rotación del motor y el porcentaje de etanol añadido a la mezcla diésel-etanol. Las relaciones entre las variables respuesta y los niveles de los factores considerados fueron exploradas y representadas por expresiones que responden al Modelo Lineal General de segundo orden, que se corresponden con superficies de respuesta cuadráticas. Se obtuvo valores máximos para el momento torsor, coeficiente de adaptabilidad y la potencia efectiva del motor así como los llamados puntos de silla en las superficies del consumo horario y el gasto específico de combustible. Los resultados obtenidos evidenciaron que la mezcla diésel-etanol debe ser empleada en motores diésel rápidos que respondan al ciclo teórico de Sabathé, de forma tal que puedan emplearse en motores y bombas comúnmente empleadas en sistemas de riego, máquinas de asperjado y fumigación, y también en autos ligeros como Peugeot, Mercedes – Benz y Hyundai.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
1.1. Fundamentos teórico-metodológicos y aplicaciones relacionadas con la Metodología de Superficie de Respuesta.	5
1.1.1. Modelo de primer orden.....	6
1.1.2. Diseños de primer orden	7
1.1.3. Diseños factoriales $2k$ completos y fraccionados	8
1.1.4. Modelo de segundo orden	9
1.1.5. Diseños de segundo orden.....	9
1.1.6. Diseños compuestos centrales y no centrales.....	10
1.1.7. Diseños compuestos centrales rotacionales.....	12
1.1.8. Modelos de la Metodología de Superficie de Respuesta y el Modelo de Regresión Lineal Múltiple	13
1.1.9. Métodos para determinar la combinación óptima de los niveles de los factores analizados	14
1.1.10. Método del factor único.	15
1.1.11. Método de la máxima pendiente: explorar ubicación del punto estacionario	16
1.1.12. Criterios de la primera y segunda derivada en la determinación de puntos extremos	17
1.1.13. Aplicaciones y software relacionados con la Metodología de Superficie de Respuesta en las Ciencias Agrarias y afines.....	18
1.2. Fundamentos teóricos para la determinación de los parámetros de los motores de combustión interna.	20
1.2.1. Características del banco de pruebas y regímenes de trabajo de los motores de combustión interna.	20
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	24

2.1	Caracterización del área de investigación.....	24
2.2	Métodos empleados en la investigación.....	24
2.3	Diseño del experimento.....	25
2.4	Técnicas empleadas para el análisis estadístico–matemático de los resultados	26
2.5	Software utilizados en la investigación.....	28
2.6	Metodología para la evaluación de los parámetros de los motores de combustión interna.....	28
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		32
3.1	Análisis estadístico de los principales indicadores analizados de los motores de combustión interna diésel al emplearse mezclas diésel – etanol. 32	
3.2	Análisis matemático en los modelos ajustados para explorar las condiciones óptimas de los niveles de los factores en estudio.	37
3.3	Propuesta de acciones Estadístico - Matemáticas para la ejecución de una segunda etapa experimental	44
CONCLUSIONES.....		47
RECOMENDACIONES		48

INTRODUCCIÓN

La aplicación de las técnicas estadísticas a las investigaciones para la planificación inicial de las experiencias y el procesamiento e interpretación de sus resultados, se ha convertido en una necesidad imperiosa de las ciencias agrícolas, particularmente, para obtener la mayor información del sistema estudiado con el mínimo de experiencias necesarias y en el menor tiempo posible. Para lograr el progreso de la agricultura en cualquiera de sus aspectos, es necesario basarse en la investigación científico-técnica, y la experimentación (Guerra, 1980).

Producto de la crisis del petróleo de los años setenta, causada por el aumento del precio de los combustibles fósiles y la preocupación por disminuir la contaminación ambiental estimulada por el transporte y otros, en el mundo se intensificaron estudios que estimulaban la introducción de los combustibles alternativos, aquellos combustibles que no son el diésel y la gasolina, tradicionalmente empleados por los medios de transporte.

Los sistemas de transporte que utilizan motores de combustión interna son una fuente de contaminación ambiental que se destacan debido a los gases emitidos hacia el medio ambiente producto de la combustión de hidrocarburos. Mundialmente, los transportes son responsables del 13% de la emisión de gases de efecto invernadero. Un 74% de estas emisiones lo ocupa el transporte terrestre, de las cuales el 40% proviene de vehículos industriales ligeros y de vehículos particulares (GREENPEACE, 2010). Por otro lado, los gases contaminantes provenientes de la combustión de un automotor, por ejemplo monóxido de carbono (CO), no pueden ser absorbidos de manera natural por las plantas, sino que se mezclan en el aire. Se ha estudiado durante años que respirar CO, aún en cantidades moderadas, llega a producir la muerte por causa de envenenamiento en la sangre, y en conjunto con los otros gases producen irritación nasal y en los ojos, aspecto que es abordado por Camarillo (2011).

Conjuntamente con lo anterior, la existencia de problemas medioambientales y la inestabilidad de los precios cada vez más pronunciada de los combustibles fósiles en el mercado internacional, condicionan la búsqueda de alternativas para resolver esta situación. La utilización de los hidrocarburos fósiles como

combustibles provoca efectos negativos al medio ambiente (Agarwal, 2007). Esta situación puede ser cambiada, por ejemplo, sustituyendo parcial o totalmente los combustibles basados en los derivados del petróleo en el sector agrícola. Los alcoholes, por ejemplo, son usados como alternativa de combustible en motores de combustión interna (Melo *et al.*, 2012).

Dentro de los alcoholes se encuentran el metanol y el etanol, siendo este último el requerido para mezclar con la gasolina. Melo *et al.* (2012) plantean que el bioetanol puede ser usado directamente en automóviles diseñados para trabajar con etanol puro o mezclado con gasolina. Ninguna modificación del motor es típicamente necesaria para usar esta mezcla. Uno de los argumentos básicos para el enriquecimiento de la gasolina con etanol es el hecho de la reducción en las emisiones de contaminantes atmosféricos. El etanol mejora la eficiencia de la combustión debido a que introduce más oxígeno a la mezcla.

El etanol se obtiene a partir de la fermentación y destilación de jugos ricos en azúcares, ejemplo, la caña de azúcar. Puede ser empleado como combustible puro en motores diseñados con este fin, o en forma de mezclas, generalmente entre 5 y 25%, con diésel o gasolina.

Aguilar (2007) señaló que no está lejano el día en que los vehículos funcionarán con combustibles totalmente renovables, basados en el etanol, biodiesel o el biogás, a partir de cultivos como el maíz, caña de azúcar y desechos agroindustriales. Según Agarwal (2007), principalmente en Brasil, el etanol es usado como combustible. En países como Estados Unidos, Canadá e India se utiliza como un aditivo de gasolina para mejorar la combustión.

En Cuba, se han realizado en los últimos años investigaciones científicas en temas de biocombustibles, en especial el bioetanol y el biodiesel (Piloto *et al.*, 2008). Actualmente, se investiga en este sentido con el objetivo de determinar las combinaciones óptimas en la mezcla alcohol-gasolina y la viabilidad de su empleo en el transporte automotor. Una posible contribución a esta problemática es la aplicación de criterios estadístico-matemáticos, vinculados a la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), reportada por Box y Wilson (1951) en la industria química.

A pesar de que no se reportan trabajos de aplicación de la MSR en procesos de mezclas que incluyen biocombustibles, varios han sido los autores que se han apoyado en esta metodología para dar respuesta a sus problemas de

investigación. En América Latina resultan de gran impacto los trabajos reportados en la Revista Agrociencia de México en las décadas de los años 70 y 80.

La literatura consultada evidencia que en Cuba son escasas las investigaciones, en particular en las Ciencias Agrarias, que apliquen la MSR. Sin embargo, se debe mencionar en el ámbito nacional la tesis doctoral presentada por Guerra (1980) que aplica la MSR para determinar las dosis óptimas de fertilización N, P, K en los cultivos de la caña de azúcar, cítricos y pastos y forrajes y el trabajo desarrollado por Miranda *et al.* (2013) donde se evalúa la estabilidad en almacén de un agente de control biológico por medio de la MSR en el Centro Nacional de Sanidad Agropecuaria (CENSA).

En consideración con lo planteado se define como,

Problema científico:

¿Cómo evaluar el funcionamiento óptimo de motores de combustión interna diésel al emplearse mezclas de diésel-etanol?

Hipótesis:

Con el empleo del análisis de superficies de respuesta se puede evaluar el funcionamiento óptimo de motores de combustión interna diésel al emplearse mezclas diésel-etanol.

Objetivo general:

Evaluar mediante el análisis de superficies de respuesta el funcionamiento óptimo de motores de combustión interna diésel al emplearse mezclas diésel-etanol.

Objetivos específicos:

- Revisar los fundamentos teórico-metodológicos relacionados con la MSR y sus aplicaciones en procesos agrarios, así como los relacionados con la determinación de los parámetros de los motores de combustión interna.
- Validar con criterios Estadístico-Matemáticos las superficies de respuesta cuadráticas obtenidas para la determinación de las posibles combinaciones óptimas de los niveles de los factores en las diferentes variables respuesta.
- Proponer criterios Estadístico-Matemáticos para la ejecución de una segunda etapa experimental.

Novedad científica:

Con los resultados de esta investigación se pone a disposición de los especialistas en esta rama, criterios de valor teórico-práctico y metodológico basados en la modelación estadístico-matemática para la aplicación de la MSR a procesos de mezclas combustibles en motores de combustión interna diésel, que puede ser aplicable a una amplia variedad de investigaciones en que se incluyen diseños de experimentos de tipo factorial para la determinación de las condiciones óptimas en que operan procesos de interés científico-investigativos.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Fundamentos teórico-metodológicos y aplicaciones relacionadas con la Metodología de Superficie de Respuesta.

Chacín (1998) señala que las ideas originales de la MSR fueron introducidas por Box y Wilson (1951) en la industria química en Estados Unidos. Éstos tratan los diseños experimentales con el fin de encontrar el punto en el cual se obtiene la máxima respuesta usando el menor número posible de tratamientos, además introducen por primera vez el concepto de Diseño Compuesto. Posteriormente estas ideas fueron extendidas (Box, 1954; Box y Youle, 1955). Más adelante se introduce el concepto de la rotabilidad (Box y Hunter 1957); no obstante, uno de los trabajos más importantes en diseños de superficies de respuestas es el de Box y Draper (1959), en el que se discuten las razones para elegir un diseño con el que puedan investigar una superficie de respuesta. La MSR es un conjunto de métodos y procesamientos estadístico-matemáticos útiles para resolver ciertos tipos de problemas científicos, procesos industriales y de ingeniería, mostrándose con mayor aplicación en el área industrial, química y agrícola. La esencia es modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras con el objetivo de optimizar dicha variable para determinar las condiciones óptimas en que opera el sistema (Chacín 1998).

Cuando se dice que el valor real esperado η , que toma la variable de interés considerada, está influido por los niveles de k factores cuantitativos $X_1, X_2, \dots, X_k$, esto significa que existe una función f de $X_1, X_2, \dots, X_k$ que proporciona el correspondiente valor de η para alguna combinación dada de niveles:

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (1.1)$$

de manera que la variable respuesta pueda expresarse como

$$Y = \eta + \varepsilon = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (1.2)$$

donde ε representa el error observado en la respuesta.

La relación $\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ que existe entre η y los niveles de los k factores puede ser representada mediante una hipersuperficie (subconjunto de un espacio euclídeo $(k+1)$ -dimensional) que se le conoce como “*superficie de respuesta*”.

Una técnica utilizada para ayudar a visualizar la forma que puede tener una superficie de respuesta tridimensional consiste en representar la gráfica de contornos de la superficie, en la que se trazan las denominadas líneas de contorno, que son curvas correspondientes a valores constantes de la respuesta sobre el plano X_1X_2 (plano cuyos ejes coordenados vienen dados por los niveles X_1 y X_2 de los factores).

Geométricamente, cada línea de contorno es una proyección sobre el plano X_1X_2 de una sección de la superficie de respuesta al intersectar con un plano paralelo al X_1X_2 . La gráfica de contornos resulta útil para estudiar los niveles de los factores en los que se da un cambio en la forma o altura de la superficie de respuesta. La existencia de gráficas de contornos no está limitada a tres dimensiones a pesar de que en el caso en que haya más de tres factores de influencia no es posible la representación geométrica. No obstante, el hecho de poder representar gráficas de contorno para problemas en que haya dos o tres factores permite visualizar más fácilmente la situación general.

Para generar la gráfica de contornos correspondiente se secciona la superficie de respuesta usando planos paralelos al X_1X_2 en ciertos valores de respuesta considerados.

La estrategia de análisis supone que el promedio (media) de la variable de respuesta está en función de los niveles cuantitativos representados por los factores $X_1, X_2, \dots, X_k$. Los modelos polinomiales son los utilizados para efectuar una aproximación práctica a la función de respuesta real. Los desarrollos incorporados en programas computacionales permiten analizar fácilmente y en forma gráfica modelos polinomiales de primer y segundo orden.

1.1.1. Modelo de primer orden

Generalmente la función f que relaciona la variable dependiente y con las variables independientes es desconocida, por ello, se requiere un modelo que aproxime dicha relación. Los modelos polinomiales son una aproximación

suficiente de la superficie de respuesta. Cuando la respuesta es una función lineal de las variables independientes, la función aproximada f es un modelo de primer orden. Un modelo de primer orden con n observaciones en q variables independientes puede ser expresado en la forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \cdots + \beta_q X_{iq} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.3)$$

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^q \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i \quad (j = 1, 2, \dots, q) \quad (1.4)$$

La respuesta y es una función de las variables independientes $X_1, X_2, \dots, X_q$, denotada como f , más el error experimental. Un modelo de primer orden es un modelo de regresión múltiple y los coeficientes β_j ($j = 1, 2, \dots, q$) son los coeficientes de la regresión.

El modelo de primer orden puede escribirse matricialmente de la forma:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (1.5)$$

donde,

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix}_{(n \times 1)} \quad X = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & \cdots & X_{1q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & \cdots & X_{nq} \end{pmatrix}_{(n \times r)} \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_q \end{pmatrix}_{(r \times 1)} \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}_{(n \times 1)}$$

$$r = q + 1$$

Si la matriz $X^T X$ es inversible, entonces el sistema lineal $Y = X\beta + \varepsilon$ tiene como solución única obtenida por el método de mínimos cuadrados $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$ (Montgomery, 2005). Luego se tiene el modelo ajustado $\hat{Y} = X\hat{\beta}$, esto es:

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^q \hat{\beta}_j X_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.6)$$

1.1.2. Diseños de primer orden

Los diseños considerados con el propósito de recoger datos para ajustar un modelo de primer orden se conocen como diseños de primer orden. Los más convenientes son los diseños factoriales 2^k y los factoriales fraccionados 2^{k-m} .

1.1.3. Diseños factoriales 2^k completos y fraccionados

Cuando se estudia el efecto que tienen k factores¹, cada uno con dos niveles fijos, en una variable respuesta Y , se tiene un diseño experimental 2^k . Para simplificar los cálculos, se codifican los factores como (-1) para el nivel bajo y (+1) para el nivel alto (López 1988). Considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los k factores, se obtiene una matriz de diseño de 2^k filas, cada una de las cuales representa un tratamiento. La Tabla 1.1 muestra la matriz de diseño para el factorial 2^2 .

Tabla 1.1 Matriz de diseño del factorial 2^2

Experiencias	X_1	X_2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Fuente: Elaboración propia

Según López (1988), en muchos casos no es posible ejecutar todas las experiencias de un plan factorial 2^k , sobre todo cuando se tienen muchos factores. Así pues, hay que valorar, en función del costo del experimento, si para ajustar un modelo de primer orden es necesario llevar a cabo las 2^k combinaciones, o si es más conveniente omitir algunas utilizando únicamente un subconjunto de los puntos de un diseño factorial 2^k . Se puede considerar en este último caso una fracción 2^{-m} de un diseño 2^k que consiste en 2^{k-m} tratamientos ($k \geq m$), siempre y cuando el diseño resultante tenga, al menos, $k + 1$ puntos, que es el número de parámetros que han de estimarse y mantenga las mismas propiedades que las del factorial completo.

¹Variables independientes o controladas

Estos planes resultan útiles cuando existen interacciones despreciables, en la determinación de variables significativas, en investigaciones secuenciales donde los resultados conducen a modificar las experiencias y cuando la influencia de varios factores se puede describir por un solo efecto principal (López 1988). Ejemplos de estos diseños son los planes 2^{3-1} , 2^{4-1} y 2^{5-1} .

1.1.4. Modelo de segundo orden

Cuando existe curvatura en la superficie de respuesta, el modelo de primer orden no es una aproximación adecuada. Para ello, se utiliza el modelo de segundo orden:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i X_i + \sum_{i=1}^q \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{\substack{j=2 \\ j>i}}^q \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1.7)$$

Según Bradley (2007), el modelo de segundo es flexible porque puede tomar varias formas funcionales y aproxima localmente la superficie de respuesta. Estos modelos son los que permiten realmente hallar el punto óptimo de una superficie de respuesta y requieren, al menos, tres niveles para cada factor (López 1988).

El caso más simple es cuando se tienen n observaciones de dos factores a tres niveles cada uno. El modelo de segundo orden para este caso es:

$$y_u = \beta_0 + \beta_1 X_{1u} + \beta_2 X_{2u} + \beta_{11} X_{1u}^2 + \beta_{22} X_{2u}^2 + \beta_{12} X_{1u} X_{2u} + \varepsilon_u \quad (1.8)$$

$$u = (1, 2, \dots, n)$$

Esta situación sugiere el uso de diseños factoriales 3^k , pero cuando se estudian más de tres factores los experimentos son grandes y además, los coeficientes β_{11} y β_{22} se estiman con baja precisión (Cochran y Cox 1999).

1.1.5. Diseños de segundo orden

Entre los diseños para estimar los coeficientes del modelo de segundo orden se encuentran:

- Diseños factoriales 3^k
- Diseños compuestos centrales (DCC) y no centrales.
- Diseños compuestos centrales rotacionales (DCR).

En estos diseños cada uno de los k factores tiene 3 niveles, luego el número de combinaciones de tratamiento es $N = 3^k$. Cuando se estudian muchos factores, N se hace excesivamente grande; por consiguiente, en ocasiones conviene más utilizar diseños factoriales fraccionados 3^{k-m} .

Estos diseños, aunque son ortogonales, no son invariantes por rotación, lo que hace que no sea muy buena su elección como diseños de modelos de segundo orden.

1.1.6. Diseños compuestos centrales y no centrales

Estos diseños son una alternativa a los diseños factoriales 3^k . Fueron propuestos por Box y Wilson (1951). Según Kuehl (2001), los diseños compuestos centrales son diseños de tratamientos factoriales 2^k con $2k$ puntos axiales a lo largo de los ejes coordenados de los niveles de factor codificados y m réplicas en el centro del diseño en las coordenadas $(0, 0, \dots, 0)$. Las coordenadas de los puntos axiales son $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, \pm\alpha)$.

El total de observaciones N para estos diseños está dado por:

$$N = 2^k + 2k + m \quad (1.9)$$

La Figura 1.1 muestra la gráfica de localización de las coordenadas de los niveles codificados para dos factores X_1 y X_2 .

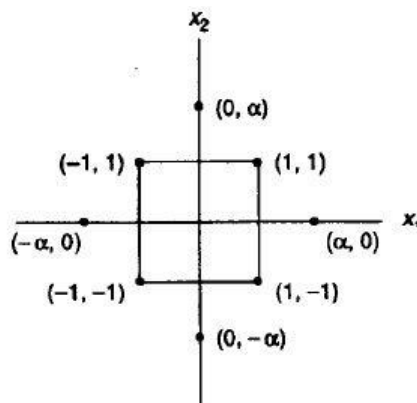


Figura 1.1 Diseño compuesto central para dos factores

La Tabla 1.2 muestra las coordenadas del diseño compuesto central para dos factores X_1 y X_2 .

Tabla 1.2 Coordenadas del diseño compuesto central para dos factores.

Aspectos	X_1	X_2
Diseño 2^2	-1	-1
	+1	-1
	-1	+1
	+1	+1
Axial	$-\alpha$	0
	$+\alpha$	0
	0	$-\alpha$
	0	$+\alpha$
Central	0	0

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 1.3 muestra los componentes de un diseño compuesto central y un experimento factorial 3^k .

Los diseños compuestos no centrales, según Cochran y Cox (1999), tienen k puntos extras, uno para cada factor. El nivel de cada factor se mueve a $(1, +\alpha)$ si el nivel óptimo parece estar más próximo a 1 que a -1; por el contrario, si parece estar más próximo a -1 que a 1, entonces se mueve a $(-1, -\alpha)$.

Tabla 1.3 Componentes de un diseño compuesto central y un experimento factorial 3^k

No. de factores (k)	2	3	4	5		6		7	
Diseño básico 2^k	2^2	2^3	2^4	2^5	2^{5-1}	2^6	2^{6-1}	2^7	2^{7-1}
No. de puntos axiales(2k)	4	6	8	10	10	12	12	14	14
No. de puntos centrales	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total de puntos del diseño	9	15	25	43	27	77	45	143	79
Distancia de los puntos axiales al centro	1,000	1,215	1,414	1,596	1,547	1,761	1,724	1,909	1,885
Total de puntos del Factorial 3^k	9	27	81	243	243	729	729	2187	2187

Fuente: Guerra (1980)

Estos diseños resultan más económicos en cuanto al uso de recursos experimentales y garantizan la estimación de superficies de respuesta.

1.1.7. Diseños compuestos centrales rotacionales.

Al establecer cualquier diseño es deseable que todas las estimaciones de las medias tengan la misma precisión. Según Kuehl (2001), una propiedad rotatoria requiere que la varianza de los valores estimados sea constante en puntos equidistantes del centro del diseño $(0, 0, \dots, 0)$.

Estos diseños se diferencian de los compuestos centrales en que α debe tomar valores de la forma $\alpha = (2^n)^{\frac{1}{4}}$. Así, por ejemplo, para 2 factores se tendrá:

$$\alpha = (2^2)^{\frac{1}{4}} = \sqrt[4]{2^2} = \sqrt{2} = 1,414 \dots$$

y para 3 factores:

$$\alpha = (2^3)^{\frac{1}{4}} = \sqrt[4]{2^3} = \sqrt[4]{8} = 1,6817 \dots$$

La Figura 1.2 muestra un diseño compuesto central rotacional para dos factores ($\alpha = \sqrt{2}$).

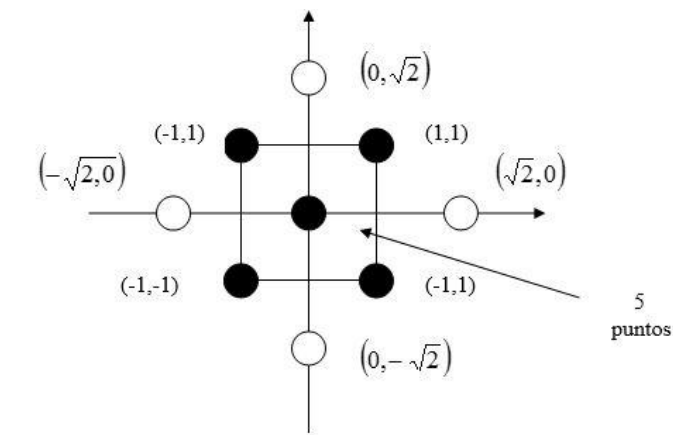


Figura 1.2 Diseño compuesto central rotacional para dos factores

La Tabla 1.4 muestra los componentes de un diseño compuesto central rotacional y un experimento factorial 3^k .

Tabla 1.4 Componentes de un diseño compuesto central rotacional y un experimento factorial 3^k

No. de factores (k)	2	3	4	5		6		7	
Diseño básico 2^k	2^2	2^3	2^4	2^5	2^{5-1}	2^6	2^{6-1}	2^7	2^{7-1}
No. de puntos axiales($2k$)	4	6	8	10	10	12	12	14	14
No. de puntos centrales	5	6	7	10	6	15	9	21	14
Total de puntos del diseño	13	20	31	52	32	91	53	163	92
Distancia de los puntos axiales al centro	1,414	1,682	2,000	2,378	2,000	2,828	2,378	3,333	2,828
Total de puntos del Factorial 3^k	9	27	81	243	243	729	729	2187	2187

Fuente: Guerra (1980)

1.1.8. Modelos de la Metodología de Superficie de Respuesta y el Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Como se expone en epígrafes anteriores, a través de la MSR se generan modelos de regresión lineal múltiple para el caso en que una variable respuesta está influenciada por dos o más variables independientes.

Como se planteó en el subepígrafe 1.1.1 el modelo lineal general de primer orden para n observaciones de una variable respuesta Y en q variables independientes $X_1, X_2, \dots, X_q$ se expresa en forma matricial como:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (1.10)$$

expandiendo esta expresión se tiene:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_q X_{iq} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.11)$$

El modelo lineal general de primer orden de regresión anterior requiere que sean cumplidos varios supuestos necesarios para evitar conclusiones erradas. Dichos supuestos han sido ampliamente discutidos por autores como Chacín (1998), Guerra *et al.* (2003), Gujarati y Porter (2009). En resumen, estos supuestos son:

- Homogeneidad de la varianza de los errores (Homocedasticidad):

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

- Independencia de los errores:

$$\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 \quad ; \quad i \neq j$$

- Aditividad de los efectos:

Esto aparece implícito en la expresión del modelo.

Para verificar el cumplimiento de estos supuestos Guerra *et al.* (2003) refieren:

- Homocedasticidad

Gráfico de los residuos, test de Cochran, Bartlett y Hartley.

- Normalidad

Test de Shapiro – Wilks, Kolmogorov – Smirnov.

- Incorrelación

Test de Durbin – Watson, rachas, signos, X^2 de independencia, Ljung y Box.

1.1.9. Métodos para determinar la combinación óptima de los niveles de los factores analizados

En muchos casos, los investigadores necesitan encontrar las condiciones experimentales que favorecen el problema en estudio. Esto se reduce a determinar la combinación óptima de los niveles de los factores considerados, es decir, aquella que aporta un mejor valor en la respuesta, ya sea un máximo o un mínimo. El procedimiento para obtener estos valores puede abordarse por medio de la MSR.

Por otro lado, y de suma importancia, es necesario conocer el comportamiento de la respuesta en la vecindad del óptimo, pues ocurre que en muchos casos no es factible establecer la combinación óptima de niveles de cada factor, puede que otras combinaciones de estos proporcionen una respuesta que resulte de mejor interés para el investigador.

Cochran y Cox (1999) plantean las siguientes cuestiones:

- Un cambio en los factores, alejándose del óptimo, puede ser preferible a causa de su efecto.

- La forma de la superficie de respuesta cerca del óptimo puede dar indicios de la naturaleza del proceso.
- La superficie puede carecer de un máximo verdadero en la región de experimentación. En este caso, se desea conocer la naturaleza de la superficie en zonas de respuesta relativamente alta.

Obviamente, el experimentador nunca quisiera estar en la última de estas cuestiones anteriores, por ello se hace necesario una planificación estricta del experimento. Asimismo, se debe adoptar uno de los siguientes criterios:

- Incluir todos los términos del modelo independientemente de su significación estadística. Aquí se supone que la inclusión de todas las variables es importante para el investigador desde el punto de vista biológico, químico, etc.
- Fijar el modelo cuyos términos resulten significativos en las pruebas correspondientes. Esto es idóneo para el caso en que se manejan diseños ortogonales, pues puede probarse por separado la significación de todos los términos del modelo, al ser estos independientes.

1.1.10. Método del factor único.

Según plantea Chacín (1998), el experimentador hace primero una estimación preliminar de la combinación óptima de niveles del factor, la cual se identificará por $X_{11}, X_{21}, \dots, X_{k1}$. Ya que cada experimento trata con un factor único, los factores deben arreglarse por el orden en el cual van a ser probados. En general, un buen plan es iniciar con el factor de mayor respuesta esperada.

En el primer experimento, todos los factores, excepto el primero, se mantienen constantes a sus niveles iniciales $X_{21}, X_{31}, \dots, X_{k1}$. El propósito de este experimento es encontrar el nivel de X_1 , el cual maximiza la respuesta para esta combinación particular de niveles de los otros factores. Hay varias formas de cómo puede llevarse a cabo el experimento. Para establecer un máximo, deben compararse cuando menos tres niveles de X_1 . Son aconsejables cuatro o cinco niveles, si el rango de X_1 es amplio y la posición del óptimo casi no se conoce o quizás un experimento inicial con cinco niveles, ampliamente espaciados, seguidos de un segundo experimento con tres niveles a un espaciamiento estrecho. Cochran y Cox (1999) plantean que igual

espaciamiento de los niveles no es, en general, el procedimiento más eficiente para localizar el óptimo y para experimentos con tres niveles.

1.1.11. Método de la máxima pendiente: explorar ubicación del punto estacionario

Según Cochran y Cox (1999) este método establece un procedimiento que permite pasar de una región experimental al centro de otra subregión con la intención de encontrar la respuesta máxima. Este procedimiento se puede emplear dentro de un programa de experimentación secuencial.

Tal como en el método del factor único, el máximo se localiza mediante una serie de experimentos cada uno planificado en base a los resultados del anterior.

En la aplicación del método de la máxima pendiente, se selecciona un determinado número de puntos en una subregión experimental. Muchos autores sugieren que el número de puntos experimentales en esta etapa de la investigación preliminar no debe ser grande. Los diseños de primer orden 2^k o sus fracciones son útiles en esta fase. Con el uso de estos diseños se obtiene la estimación del modelo de primer orden.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \cdots + \beta_q X_{qi} \quad (1.12)$$

Luego se sigue el recorrido de la máxima pendiente.

Este recorrido se buscaría en la dirección perpendicular a las curvas de nivel e indica las cantidades relativas en las cuales los niveles de los factores deben variarse para encontrar un aumento máximo en la respuesta. Con la utilización del procedimiento de la máxima pendiente se llegan a auto-eliminar las etapas iniciales de la investigación una vez cumplida su función y la aplicación se encuentra con la dificultad de que mientras más alta es la superficie de respuesta lograda, más reducidos o pequeños son los valores de los estimadores de $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ y más difícil sería estimar los parámetros con una precisión apropiada en los puntos secuenciales posteriores e incluso, la aproximación de la superficie de respuesta mediante un polinomio llega a ser menos satisfactoria siendo conveniente considerar los términos de orden superior.

En estos casos, si el método de la máxima pendiente no logra ubicar el punto de la máxima respuesta, la cual se identifica por obtención de estimadores de parámetros que son pequeños en valores absolutos en relación a los errores estándar de estimación, se requiere luego pruebas adicionales, agregando algunos puntos experimentales para confirmar que se encuentra en una región semi-estacionaria.

Es conveniente señalar que todos los factores son incluidos en los ensayos iniciales. Al final de cada ensayo se ajusta una función polinomial aproximada a la superficie de respuesta $\theta(X_1, X_2, \dots, X_k)$ con los resultados experimentales y se utiliza para determinar las condiciones del siguiente experimento.

1.1.12. Criterios de la primera y segunda derivada en la determinación de puntos extremos

Cuando se ha estimado la superficie de respuesta, esto es, el modelo de segundo orden:

$$\hat{Y}_i = b_0 + \sum_{i=1}^q b_i X_i + \sum_{i=1}^q b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{\substack{j=2 \\ j>i}}^q b_{ij} X_i X_j \quad (1.13)$$

este se utiliza para la predicción de la respuesta en valores de $X_1, X_2, \dots, X_q$. No es apropiado realizar extrapolaciones fuera de la región experimental.

Si el objetivo es determinar las condiciones en $X_1, X_2, \dots, X_q$ que maximicen la respuesta y considerando el caso que se tiene la superficie fijada para un solo factor X , el modelo sería:

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_i X_i + b_{ii} X_i^2 \quad (1.14)$$

que al derivar e igualar a 0 se obtiene:

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X} = b_i + 2b_{ii} X_i = 0 \quad (1.15)$$

$$X = -\frac{b_i}{2b_{ii}} \quad (1.16)$$

Este valor obtenido para X representa el punto estacionario, el cual puede ser un máximo si $\frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} < 0$, o un mínimo si $\frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} > 0$. Para el caso en que se tenga más de un factor, los puntos estacionarios serán aquellos que anulen simultáneamente las derivadas $\frac{\partial Y}{\partial X_1}, \frac{\partial Y}{\partial X_2}, \dots, \frac{\partial Y}{\partial X_q}$. Esta situación expresada matricialmente sería:

$$\hat{Y} = b_0 + X^T b + X^T B X \quad (1.17)$$

donde,

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_k \end{pmatrix}_{(k \times 1)}, b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix}_{(k \times 1)}, B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & \dots & b_{1k}/2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{1k}/2 & b_{2k}/2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & b_{kk} \end{pmatrix}_{(k \times k)} \quad B \text{ simétrica}$$

Derivando e igualando a 0:

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} (b_0 + X^T b + X^T B X) = 0 \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X} = b + 2BX = 0 \quad (1.19)$$

$$X_0 = -B^{-1}b/2 \quad (1.20)$$

Este punto estacionario puede ser un máximo, un mínimo o un punto de silla. En el caso que se consideren uno o dos factores se pueden elaborar gráficos y con la ayuda de los contornos de respuesta constante se obtiene una clara indicación de la naturaleza de X_0 . Para el caso de tener más de dos factores, el análisis gráfico se dificulta considerablemente, por lo que es necesario recurrir a otros procedimientos.

1.1.13. Aplicaciones y software relacionados con la Metodología de Superficie de Respuesta en las Ciencias Agrarias y afines

En Cuba son escasos los trabajos reportados relacionados con la MSR y sus aplicaciones en el ámbito agrario. En tal sentido, se reporta la investigación de

Guerra (1980) quien aplica la MSR para determinar las dosis óptimas de fertilización N, P y K en los cultivos de la caña de azúcar, cítrico y pasto. En este caso en la región experimental correspondientes a factoriales completos 3^k ($k= 2, 3$) en diseños de bloques al azar, se exploraron DCC y DCR (completos, con factoriales fraccionados 2^{k-1} y bloques incompletos). Se siguió un proceso de simulación por el Método de Monte Carlo.

Por otra parte, se reporta en el CENSA el trabajo de Miranda *et al.* (2013), relacionado con la aplicación de la MSR para evaluar la estabilidad en almacén de un agente de control biológico, publicado en la Revista Protección Vegetal. Los autores mediante un Análisis de Componentes Principales identificaron los factores de mayor incidencia y finalmente por medio de la MSR se obtuvo la combinación de porcentaje de relleno de zeolita y temperatura de almacenamiento que favoreció la germinación, utilizando un DCC con dos factores.

En el contexto internacional se reportan trabajos relacionados con la panificación. Milde *et al.* (2009) determinaron mediante la MSR la combinación óptima de grasa, huevo y leche en los rangos ensayados, lo cual permitió obtener un panificado con propiedades de textura aceptables, utilizando el nivel intermedio de huevo y leche y superior de grasa, al priorizar la disminución de la elasticidad por sobre la firmeza. También se reporta la aplicación de un DCR de dos factores dado por Torres *et al.* (2016), para la evaluación de sedimentos de pulque (xaxtle), como cultivo iniciador para obtener un producto de panificación de bajo índice glucémico y obtener la cantidad óptima de xaxtle para la producción de pan.

Por otro lado, se tiene el trabajo desarrollado por Bradley (2007) quien abordó aspectos teórico-prácticos relacionados con la MSR y el desarrollado por Rodríguez (2018) quien evaluó el rendimiento de la obtención del biodiesel mediante el proceso de transesterificación de aceite de soja usando la MSR.

También se reportan las aplicaciones de la MSR en los trabajos de González *et al.* (2006), Contreras *et al.* (2010), Aredo *et al.* (2014), Del Ángel *et al.* (2015), Sandoval (2016), Sánchez (2016) y Díaz (2017), en investigaciones agrícolas.

En los paquetes estadísticos más tradiciones es posible aplicar la MSR, con el apoyo de una o más opciones de trabajo, que pueden ser complementadas con

paquetes matemáticos como el MATLAB, sobre todo en los gráficos para determinar los contornos de la superficie y la determinación de puntos óptimos, entre otros aspectos. Por otra parte resulta de gran interés en la actualidad las posibilidades que brindan los sistemas informáticos libres.

Lenth (2009; 2012; 2016) aporta buenos criterios en sus artículos con orientaciones relacionadas con el uso de software especialmente para la MSR. Esta autora hace referencia a versiones del paquete rsm en forma gráfica y metodológica y a la MSR usando el paquete estadístico libre R.

López y Ruiz (2011) plantean que el paquete estadístico R reúne las características necesarias para trabajar el modelado estadístico, particularmente, el modelado a través del Modelo Lineal General. La manera en que trabaja R con decisiones y pasos sucesivos se adapta fácilmente a la filosofía del modelado. Estos autores también refieren que R está especialmente diseñado para el trabajo con cualquiera de las funciones matemáticas que comprenden los Modelos Lineales Generalizados. Una buena contribución del Modelo Lineal General explicado en R es la aportada por Crawley (2007).

1.2. Fundamentos teóricos para la determinación de los parámetros de los motores de combustión interna.

Los fundamentos teóricos para el análisis del proceso de combustión se consideraron de acuerdo a lo planteado por Anojin y Sajarov (1970); Jovaj y Mázlov (1973); Pancratov (1979); Kralob y Antono (1980) y Soca (1987).

1.2.1. Características del banco de pruebas y regímenes de trabajo de los motores de combustión interna.

En la mayoría de los casos las propiedades explotativas de los motores se determinan por sus características fundamentales (velocidad, carga y consumo). Según Gonzáles (1993), generalmente se utiliza la dependencia entre los indicadores que se obtienen en el banco de prueba al someter a cargas artificiales a un determinado motor. Los indicadores principales de las características del motor son los siguientes:

- frecuencia nominal de giro cigüeñal (n_n) que está determinada por la documentación técnica y corresponde a la potencia efectiva nominal (Ne_n),

momento tursor (Me_n), consumo horario nominal de combustible (Gh_n) y gasto específico nominal de combustible (ge_n),

- análogamente para el régimen de trabajo en vacío se tiene $n_{vacío}$,
- para el régimen de momento máximo Me_{max} , n_{max} , Ne_{max} , Gh_{max} , ge_{max} ,
- para el régimen de revoluciones mínimas en vacío del motor Me_{min} , n_{min} , Ne_{min} , Gh_{min} , ge_{min} .

A partir de estos indicadores, se obtiene que:

Momento tursor (Me):

$$Me = Pbe * \beta * 10, \text{ Nm} \quad (1.21)$$

Potencia efectiva (Ne):

$$Ne = \frac{Mt * n}{9550}, \text{ kW} \quad (1.22)$$

Consumo horario de combustible (Gh):

$$Gh = \frac{Gc}{t} * 3,6, \text{ L/h} \quad (1.23)$$

Gasto específico de combustible (ge):

$$ge = \frac{Gh}{Ne}, \text{ L/kWh} \quad (1.24)$$

Coeficiente de adaptabilidad del motor (KtMt):

$$KtMt = \frac{Me}{275}$$

(1.25)

donde: Pbe : esfuerzo de frenado, kgf; β : distancia, m; Gc : gasto de combustible mL; t : tiempo en el que se consume el combustible suministrado, s. Los indicadores del motor en un proceso de carga variable son diferentes de aquellos que aparecen con una carga fija o constante y que se obtienen en un banco de pruebas.

La influencia del carácter de la carga en las condiciones de explotación se calcula por medio de los coeficientes siguientes:

- coeficiente dinámico (λ_d)
- coeficiente de tiempo (λ_t)
- coeficiente de probabilidad (λ_y)

El coeficiente común de influencia del carácter de carga (λ) es:

$$\lambda = \lambda_d * \lambda_t * \lambda_y \quad (1.26)$$

El coeficiente λ_d tiene en cuenta la dinámica del proceso de trabajo del motor, o sea, el grado de llenado de los cilindros, coeficiente de exceso de aire en la cámara y otros. El coeficiente λ_t caracteriza los cambios de probabilidad de los indicadores en el trabajo durante un periodo (t) a causa del gasto, desarreglos, disminución de la fiabilidad. El coeficiente λ_y tiene en cuenta la variación de los valores medios de los índices explotativos del motor bajo un carácter no lineal de dependencia.

Estos coeficientes son el cociente de la esperanza matemática de los indicadores explotativos del motor y el mismo indicador obtenido en condiciones de laboratorio

$$\lambda_y = \frac{Y'}{Y} = 1 + \frac{\Delta Y_y}{Y} \quad (1.27)$$

donde: $\Delta Y_y = Y' - Y$ es la diferencia de la esperanza matemática de uno de los parámetros del motor obtenidos en condiciones de explotación y ese mismo parámetro obtenido en condiciones de laboratorio (bancos de pruebas).

La Figura 1.3 muestra las características de velocidad típica del motor

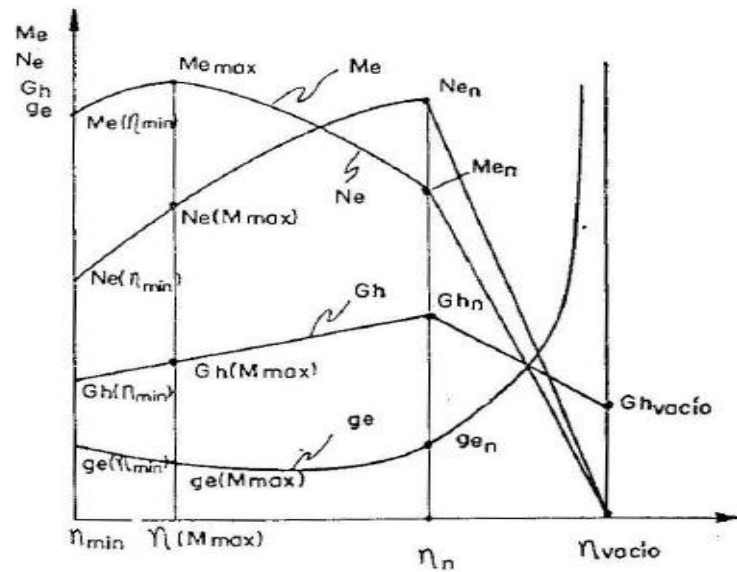


Figura 1.3 Características de velocidad típica del motor

El funcionamiento de los motores de combustión interna se evalúa a través de los siguientes coeficientes:

- **Coeficiente de adaptación del torque:** Este parámetro caracteriza la reserva que posee el motor para vencer las sobrecargas y en cierta medida define la estabilidad de funcionamiento. Se calcula por medio de la expresión:

$$K_t = \frac{M_{e_{max}}}{M_{e_{nom}}} \quad (1.28)$$

donde: $M_{e_{max}}$: momento torsor efectivo máximo, Nm; $M_{e_{nom}}$: momento torsor efectivo en el régimen nominal, Nm.

Este coeficiente para motores de combustión interna diésel toma valores inferiores a 1,15 ($K_t < 1,15$).

- **Coeficiente de adaptación de la frecuencia de rotación:** Este parámetro evalúa la elasticidad del motor; es decir, cuánto puede variar (disminuir) la frecuencia de rotación del motor sin agotar su reserva de torque. Se calcula mediante la expresión:

$$K_v = \frac{n(M_{e_{max}})}{n_{nom}} \quad (1.29)$$

donde: $n(M_{e_{max}})$: frecuencia de rotación correspondiente al máximo torque, rpm, n_{nom} : frecuencia de rotación nominal, rpm.

Este coeficiente para motores de combustión interna diésel toma valores entre 0,55 y 0,70 ($0,55 < K_v < 0,70$).

- **Grado de carga:** Este parámetro tiene gran importancia en la explotación y selección de los motores de combustión interna, especialmente para las labores agrícolas mecanizadas. El motor de combustión interna diésel para tractores, máquinas agrícolas y la construcción se debe seleccionar de forma tal que siempre se explote en el ramal de carga o de regulación y que utilice entre el 85 y 98% de su potencia máxima. El grado de carga se determina como:

$$C = \frac{Ne_x}{Ne_{nom}} \quad (1.30)$$

donde: Ne_x : potencia efectiva que se utiliza (kW).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización del área de investigación.

La experiencia se ejecutó en febrero del año 2017 en el Laboratorio de Motores de la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad Agraria de La Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez" (UNAH), situada en el km 23 ½ de la Autopista Nacional y a 4 Km del municipio San José de Las Lajas provincia Mayabeque en Cuba. La presente investigación está en correspondencia con una de las funciones del centro, que es realizar actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación tecnológica, dirigidas a la creación y aplicación de nuevos conocimientos en la rama de la Ingeniería Agrícola.

2.2 Métodos empleados en la investigación.

La metodología empleada tiene como base una investigación de tipo experimental con la ejecución de un experimento factorial completo para mezclas de combustibles que incluyen un derivado de la caña de azúcar (etanol).

Los métodos teóricos y empíricos empleados en la investigación fueron los siguientes:

Teóricos:

- Histórico – Lógico:

Permitió estudiar la evolución de la MSR y sus aplicaciones en procesos agrarios y de mezclas.

- Análisis y síntesis:

Se empleó para realizar un análisis de la información obtenida de las fuentes bibliográficas acerca de la MSR y sus aplicaciones y en la discusión crítica de los resultados.

Empíricos:

- Análisis documental:

Se utilizó para la recopilación de información necesaria sobre la MSR y sus aplicaciones, así como la relacionada con motores de combustión interna al emplearse mezclas de combustibles.

- Experimental:

Se llevó a cabo un experimento factorial completo para mezclas de combustibles que incluyó diésel y etanol.

2.3 Diseño del experimento.

Durante el período experimental se utilizó etanol hidratado con el 95% de pureza procedente de la caña de azúcar y probado en motores diésel de combustión interna. En el experimento se utilizó un motor diésel de cuatro tiempos sin compresor, correspondiente a tractores modelo JUMZ-6KM. Cada litro de mezcla de combustible se compone de un porcentaje de combustible convencional (diésel) y se completa con porcentajes de etanol inferiores al 30%. Los factores y niveles considerados fueron etanol dado en porcentaje (0, 10, 15, 20, 25) y la frecuencia de rotación del motor dada en revoluciones por minuto, rpm (1321, 1530, 1624, 1709, 1781), conformando un Factorial 5^2 .

Se considera el análisis de aspectos medioambientales, económicos y funcionales de los parámetros asociados a los motores de combustión interna, por lo que se miden las siguientes variables respuesta:

- Momento Torsor
- Potencia efectiva
- Consumo horario de combustible
- Gasto específico de combustible
- Coeficiente de adaptabilidad del motor

La Tabla 2.1 muestra las principales especificaciones y características técnicas del motor de combustión interna diésel utilizado en el experimento.

Tabla 2.1 Principales especificaciones y características técnicas del motor diésel de cuatro tiempos sin compresor empleado en la investigación.

Principales características	Especificaciones
Tipo de motor	Diésel cuatro tiempos sin compresor
Potencia nominal	44,1 KW (60 CV)
Revoluciones por minuto (nominal)	1750 rpm
Momento torsional (nominal)	275 Nm (27,5 kgf.m)
Cilindrada	4,94 L
Consumo específico de combustible	138 g/kWh

Fuente: Elaboración propia

2.4 Técnicas empleadas para el análisis estadístico–matemático de los resultados

En el procesamiento y análisis estadístico de la información originada del experimento resultó de gran interés el Análisis Estadístico Multivariado

enfocado a Modelos de Regresión Lineal Múltiple que representan superficies de respuesta cuadráticas.

La relación entre las variables dependientes y las independientes se expresó en general en función del siguiente modelo de superficie de respuesta cuadrática:

$$y_u = \beta_0 + \beta_1 X_{1u} + \beta_2 X_{2u} + \beta_{11} X_{1u}^2 + \beta_{22} X_{2u}^2 + \beta_{12} X_{1u} X_{2u} + \varepsilon_u \quad u = (1, 2, \dots, n)$$

donde: y_u es la respuesta, X_{1u} y X_{2u} las variables independientes, β_0 es el coeficiente constante, β_i , β_{ii} , y β_{ij} ($i, j = 1, 2 \ i < j$) son los coeficientes lineales, cuadráticos y de interacción, respectivamente y ε_u mide el error experimental, que cumple $\varepsilon_u \sim NI(0, \sigma^2)$.

Para validar la bondad de ajuste de los modelos de superficie de respuesta cuadrática se consideran algunos de los criterios reportados por Guerra *et al.* (2003), estos fueron:

- Significación estadística del modelo mediante la prueba F total
- Significación estadística de los parámetros del modelo mediante las pruebas F parciales
- Coeficiente de determinación (R^2) en %
(Se considera para el análisis matemático las superficies cuadráticas que expliquen al menos el 70% de la variabilidad total)
- Valoración del cumplimiento de los supuestos teóricos de los errores experimentales

Con respecto al cumplimiento de los supuestos de los errores experimentales, se estandarizaron los residuos para ajustarlos a la distribución Normal con media 0 y varianza 1, con lo cual se incluye el cumplimiento del supuesto de varianza homogénea, al ser esta 1, mediante la aplicación de la dística de Kolmogorov-Smirnov (K-S). En cuanto a la independencia o incorrelación de los errores, se consideró su cumplimiento mediante la dística de Durbin-Watson.

Se consideró como una buena aproximación del modelo de superficie cuadrática de respuesta en la región de estudio, con vistas a explorar la presencia de puntos estacionarios (máximos y punto de ensilladura), que cumplan los siguientes aspectos:

- Significación estadística del modelo.

- Significación estadística de al menos el 50% de los parámetros.
- R^2 al menos del 70%.

Una vez obtenida la superficie de respuesta cuadrática y su validez teórica, se consideró del Análisis Matemático las condiciones necesarias y suficientes para la localización de puntos estacionarios (mínimo, máximo o punto de ensilladura) de las superficies obtenidas y la interpretación de las curvas de nivel de éstas (contornos de la superficie). Luego, se determinó la presencia de estos puntos estacionarios o la dirección en que éstos deben ser explorados en la región experimental.

2.5 Software utilizados en la investigación.

Para el correspondiente análisis estadístico–matemático realizado a los datos de la investigación se utilizaron los paquetes informáticos STATGRAPHICS Centurión XVI (2013) y Matlab R2013a (2013).

Las expresiones de los modelos de superficie de respuesta cuadrática fueron obtenidas con el software STATGRAPHICS Centurión XVI (2013) y los correspondientes criterios de bondad de ajuste.

Las consideraciones del análisis matemático con respecto a las condiciones necesarias y suficientes de existencia de puntos estacionarios así como las correspondientes gráficas de las superficies de respuesta estimadas y sus contornos fueron ejecutadas y visualizadas a través del software Matlab R2013a (2013).

2.6 Metodología para la evaluación de los parámetros de los motores de combustión interna

Para el análisis de los principales indicadores de los motores de combustión interna, se deben desarrollar las metodologías orientadas a la determinación de las condiciones de prueba de estos motores con el empleo de diferentes mezclas de diésel-etanol.

Las características de los motores fueron tomadas por las instalaciones del freno. Estas instalaciones aseguran las cargas estables y su regulación suave en una gran gama de variación de la frecuencia de rotación. Se emplean las instalaciones de frenado (bancos) mecánicas, hidráulicas y/o eléctricas de acuerdo a lo aportado por Soca *et al.* (1994).

La Figura 2.1 muestra bancos de prueba para motores de combustión interna.



Figura 2.1 Bancos de prueba para motores de combustión interna

Para medir el consumo de combustible, las instalaciones consisten en un recipiente colocado en una balanza de precisión determinada del cual se suministra el combustible al motor.

Para medir la frecuencia de rotación del motor se emplea un tacómetro digital (Figura 2.2).



Figura 2.2 Tacómetros digitales empleados en pruebas de motores de combustión interna

Para medir el tiempo de la prueba se emplean cronómetros digitales, con grado de precisión de $\pm 0,01s$ (Figura 2.3).



Figura 2.3 Cronómetro digital para medir el tiempo de la prueba

Para determinar el comportamiento de los principales parámetros de los motores de combustión interna, utilizando diferentes mezclas de diésel-etanol se debe seguir los pasos siguientes:

- Revisar las características técnicas del motor y su conexión al sistema de arranque;
- Revisar el sistema de arranque mediante el banco de prueba del freno, (interruptor o conmutador, la alimentación eléctrica del banco y revisar la carga de la batería);
- Revisar el sistema de alimentación (tubería de combustible, filtros, bomba de inyección, depósito de combustible, balanza y el combustible), todo debe estar adecuadamente instalado;
- Revisar la instalación de la evacuación de los gases de escape, (por seguridad);
- Revisar el sistema de enfriamiento, (tensión de la correa y el nivel de agua);
- Preparar la mezcla de combustible correspondiente a la medición, vaciar el tanque (depósito de combustible calibrado) y añadir la mezcla correspondiente;
- Arrancar el motor y colocarlo al régimen nominal y esperar a que adquiera la temperatura nominal (85°C a 90°C);
- Estando el motor encendido acelerarlo al máximo de revoluciones y ponerle carga a un 25% menor que la revoluciones máximas y realizar las mediciones correspondientes;

- Colocar carga correspondiente a las revoluciones nominales y repetir las lecturas;
- Colocar carga al 25% por encima de las revoluciones nominales y tomar las lecturas correspondientes;
- Colocar cargas al momento torsor máximo y repetir las mediciones.

Este procedimiento se repite para cada una de las mezclas diésel-etanol predeterminadas (NC ISO 2288, 2004).

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis estadístico de los principales indicadores analizados de los motores de combustión interna diésel al emplearse mezclas diésel – etanol.

Una vez obtenida la información de las expresiones de los indicadores se representó la relación de éstos con la frecuencia de rotación del motor y los porcentos de etanol por medio del modelo de superficie cuadrática de respuesta.

Tabla 3.1 Criterios de bondad de ajuste y verificación de los supuestos teóricos del modelo para la variable momento torsor.

Expresión de la superficie cuadrática de respuesta			
$Mt = -2806.62 + 4,27965x_1 + 4,71298x_2 - 0,0832518x_1^2 - 0,00177452x_2^2 + 0,000140009x_1x_2$			
Significación del modelo y los parámetros			
Aspectos a considerar		Estadístico	p-valor
Modelo		119,71	0,0000
Estimadores de los parámetros	$\widehat{\beta}_0$	-4,88373	0,0001
	$\widehat{\beta}_1$	0,654467	0,5207
	$\widehat{\beta}_2$	6,3423	0,0000
	$\widehat{\beta}_3$	-1,05188	0,3060
	$\widehat{\beta}_4$	-7,40877	0,0000
	$\widehat{\beta}_5$	0,0359066	0,9717
Coeficiente de determinación (R^2)		96,92%	
Supuestos teóricos del modelo			
Supuesto		Estadístico	p-valor
Normalidad		K-S =0,957	0,200
Homocedasticidad			
Incorrelación		1,75021	0,1003

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3.1 muestra los criterios de bondad de ajuste considerados y la verificación de los supuestos teóricos del modelo de superficie cuadrática para el momento torsor del motor.

Con un nivel de significación de 0,05, el modelo obtenido resultó estadísticamente significativo con p-valor = 0,0000; sin embargo, no resultaron estadísticamente significativo los efectos lineal y cuadrático del etanol así como el efecto de la interacción de éste con la frecuencia de rotación del motor. El modelo mostró un elevado coeficiente de determinación ($R^2=96,92\%$).

Al estandarizar los residuos para identificarlos con la distribución normal con media 0 y varianza 1, se incluye el cumplimiento del supuesto de varianza homogénea. Al aplicar la dócima de Kolmogorov–Smirnov se obtuvo como estadístico y p-valor: KS = 0,095, p-valor = 0,2000; con lo cual se cumple el supuesto de normalidad. A su vez, el estadístico de Durbin–Watson arrojó un valor de 1,75021 con p-valor = 0,1003, lo que acredita que los residuos son incorrelacionados.

Se considera que los resultados del análisis estadístico y el cumplimiento de los supuestos teóricos aportan validez al modelo para realizar el correspondiente análisis matemático.

La Tabla 3.2 muestra los criterios de bondad de ajuste considerados y la verificación de los supuestos teóricos del modelo de superficie cuadrática para la variable coeficiente de adaptabilidad del motor.

Tabla 3.2 Criterios de bondad de ajuste y verificación de los supuestos teóricos del modelo para la variable coeficiente de adaptabilidad del motor.

Expresión de la superficie cuadrática de respuesta			
$KtMt = -10,2059 + 0,0155x_1 + 0,0171x_2 - 0,000302x_1^2 - 0,00000645x_2^2 + 0,000000509x_1x_2$			
Significación del modelo y los parámetros			
Aspectos a considerar		Estadístico	p-valor
Modelo		119,71	0,0000
Estimadores de los parámetros	$\widehat{\beta}_0$	-4,88373	0,0001
	$\widehat{\beta}_1$	0,654467	0,5207
	$\widehat{\beta}_2$	6,3423	0,0000
	$\widehat{\beta}_3$	-1,05188	0,3060
	$\widehat{\beta}_4$	-7,40877	0,0000
	$\widehat{\beta}_5$	0,0359066	0,9717
Coeficiente de determinación (R^2)		96,92%	
Supuestos teóricos del modelo			
Supuesto		Estadístico	p-valor
Normalidad		K-S =0,957	0,200
Homocedasticidad			
Incorrelación		1,75021	0,1003

Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de adaptabilidad del motor es proporcional al momento torsor, luego los resultados de las pruebas estadísticas para estas variables con respecto a la significación del modelo y sus parámetros así como el cumplimiento de los supuestos teóricos, son similares.

Luego se considera válido el modelo para el correspondiente análisis matemático.

La Tabla 3.3 muestra los criterios de bondad de ajuste considerados y la verificación de los supuestos teóricos del modelo de superficie cuadrática para la variable gasto específico de combustible.

Tabla 3.3 Criterios de bondad de ajuste y verificación de los supuestos teóricos del modelo para la variable gasto específico de combustible

Expresión de la superficie cuadrática de respuesta		
$ge = 11,1639 + 0,0789x_1 - 0,0141x_2 - 0,000126x_1^2 + 0,00000459x_2^2 - 0,0000469x_1x_2$		
Significación del modelo y los parámetros		
Aspectos a considerar	Estadístico	p-valor
Modelo	6,01	0,0036
Estimadores de los parámetros	$\hat{\beta}_0$	2,47959
	$\hat{\beta}_1$	1,89749
	$\hat{\beta}_2$	-2,3706
	$\hat{\beta}_3$	-0,267117
	$\hat{\beta}_4$	2,31868
	$\hat{\beta}_5$	-1,8233
Coeficiente de determinación (R^2)		68,23%
Supuestos teóricos del modelo		
Supuesto	Estadístico	p-valor
Normalidad	K-S =0,957	0,200
Homocedasticidad		
Incorrelación	1,82504	0,1663

Fuente: Elaboración propia

El modelo para el gasto específico de combustible resultó estadísticamente significativo con $p=0,0036$ a pesar de no presentar un coeficiente de determinación aceptable ($R^2=68,23\%$) y de no resultar estadísticamente significativo los efectos lineal y cuadrático del etanol y el de interacción de éste con la frecuencia de rotación del motor.

Con respecto al cumplimiento de los supuestos de los errores, el modelo fue avalado por éstos, con lo cual se considera válido.

Aunque el coeficiente de determinación $R^2=68,23\%$ no sobrepasa el 70%, se realizó el correspondiente análisis matemático.

La Tabla 3.4 muestra los criterios de bondad de ajuste considerados y la verificación de los supuestos teóricos del modelo de superficie cuadrática para la variable potencia efectiva del motor.

Tabla 3.4 Criterios de bondad de ajuste y verificación de los supuestos teóricos del modelo para la variable potencia efectiva

Expresión de la superficie cuadrática de respuesta			
$Ne = -640,213 - 0,979412x_1 + 0,996176x_2 - 0,0181285x_1^2 - 0,000361124x_2^2 + 0,00125334x_1x_2$			
Significación del modelo y los parámetros			
Aspectos a considerar		Estadístico	p-valor
Modelo		43,26	0,0000
Estimadores de los parámetros	$\widehat{\beta}_0$	-5,08693	0,0002
	$\widehat{\beta}_1$	-0,842196	0,4138
	$\widehat{\beta}_2$	5,95254	0,0000
	$\widehat{\beta}_3$	-1,37344	0,1912
	$\widehat{\beta}_4$	-6,51814	0,0000
	$\widehat{\beta}_5$	1,74273	0,1033
Coeficiente de determinación (R^2)		93,92%	
Supuestos teóricos del modelo			
Supuesto		Estadístico	p-valor
Normalidad		K-S =0,957	0,200
Homocedasticidad			
Incorrelación		2,20161	0,1526

Fuente: Elaboración propia

En el modelo de superficie cuadrática para la potencia efectiva del motor resultaron no significativos los efectos lineal y cuadrático del etanol así como el de interacción de éste con la frecuencia de rotación del motor a un nivel de significación de 0,05. El modelo resultó estadísticamente significativo con $p=0,0000$ y presentó un alto coeficiente de determinación ($R^2=93,92\%$).

Por otro lado, el modelo cumplió con los supuestos teóricos de los residuos, por lo cual se considera válido para realizar el análisis matemático correspondiente. La Tabla 3.5 muestra los criterios de bondad de ajuste considerados y la verificación de los supuestos teóricos del modelo de superficie cuadrática para la variable consumo horario de combustible.

Tabla 3.5 Criterios de bondad de ajuste y verificación de los supuestos teóricos del modelo para la variable consumo horario de combustible.

Expresión de la superficie cuadrática de respuesta			
$Gh = 358,189 + 3,5141x_1 - 0,422011x_2 - 0,00703607x_1^2 + 0,000126014x_2^2 - 0,00195205x_1x_2$			
Significación del modelo y los parámetros			
Aspectos a considerar		Estadístico	p-valor
Modelo		16,84	0,0000
Estimadores de los parámetros	$\widehat{\beta}_0$	2,91297	0,0089
	$\widehat{\beta}_1$	2,51159	0,0212
	$\widehat{\beta}_2$	-2,65418	0,0157
	$\widehat{\beta}_3$	-0,415487	0,6824
	$\widehat{\beta}_4$	2,45889	0,0237
	$\widehat{\beta}_5$	-2,33972	0,0304
Coeficiente de determinación (R^2)		81,59%	
Supuestos teóricos del modelo			
Supuesto		Estadístico	p-valor
Normalidad		K-S =0,957	0,200
Homocedasticidad			
Incorrelación		1,90123	0,1822

Fuente: Elaboración propia

El modelo ajustado para la variable consumo horario de combustible resultó estadísticamente significativo con valor $p=0,0000$ y mostró un coeficiente de determinación de 81,59%. El efecto cuadrático del etanol no resultó estadísticamente significativo.

Con respecto al cumplimiento de los supuestos teóricos de los errores, se cumplen, lo cual aporta validez al modelo.

Se considera válido el modelo para realizar el correspondiente análisis matemático.

En resumen, en el análisis estadístico realizado se evidencia que el efecto del etanol no resulta estadísticamente significativo para las variables respuestas; sin embargo, se considera para realizar el análisis matemático correspondiente a las superficies cuadráticas obtenidas.

En el siguiente análisis matemático para cada variable respuesta se precisaron aspectos con mayor claridad que aportaron más elementos para la propuesta a realizar de una segunda etapa experimental.

3.2 Análisis matemático en los modelos ajustados para explorar las condiciones óptimas de los niveles de los factores en estudio.

Obtenidas las expresiones de los modelos de superficie cuadrática ajustados y analizados de acuerdo a los criterios de bondad de ajuste considerados y el cumplimiento de los supuestos de los errores, se muestra el correspondiente análisis matemático de éstos para explorar las condiciones óptimas en que opera el proceso de mezcla en cada variable.

La Figura 3.1 muestra la gráfica de la superficie de respuesta estimada y sus correspondientes curvas de nivel para la variable momento torsor del motor.

Una simple inspección de la gráfica sugiere un aumento en el momento torsor del motor cuando aumentan los porcentos de etanol y disminuyen los niveles de frecuencia de rotación del motor simultáneamente.

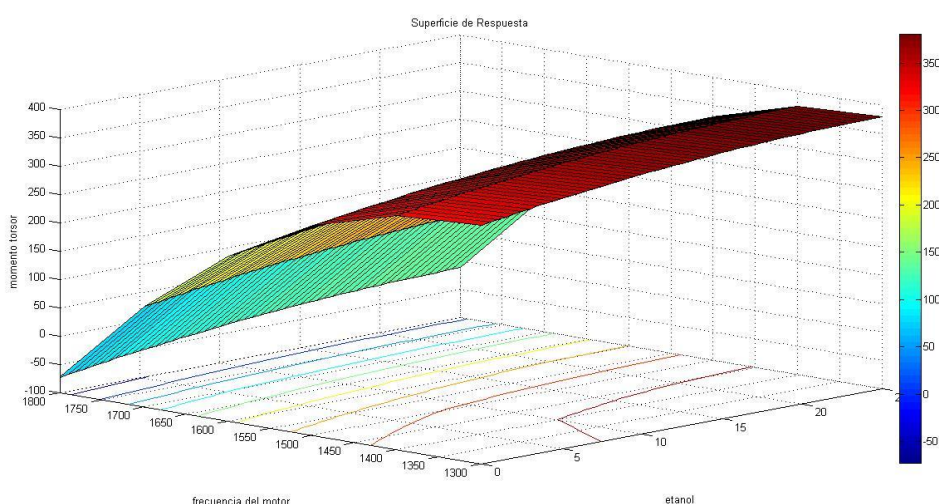


Figura 3.1 Superficie de respuesta estimada y curvas de nivel para la variable momento torsor

Por otro lado, se observa una tendencia a cero del momento torsor del motor a medida que aumenta la frecuencia de rotación. Díaz (2017) observó también una tendencia a cero en el momento torsor cuando aumentaban los niveles de frecuencia de rotación del motor y obtuvo los mayores valores del momento torsor para una frecuencia mínima de 1321 rpm.

La expresión de la superficie de respuesta ajustada para el momento torsor del motor es:

$$Mt = -2806.62 + 4,279x_1 + 4,712x_2 - 0,083x_1^2 - 0,0017x_2^2 + 0,00014x_1x_2$$

donde x_1 y x_2 representan los niveles de etanol y frecuencia de rotación del motor respectivamente.

Las expresiones de las derivadas parciales del momento torsor con respecto al etanol y a la frecuencia de rotación del motor son, respectivamente:

$$Mt_{x_1} = 4,27965 - 0,1665036x_1 + 0,000140009x_2$$

$$Mt_{x_2} = 4,71298 + 0,000140009x_1 - 0,00354904x_2$$

Las condiciones necesaria y suficiente para la existencia de extremos en funciones reales de dos variables reales arrojaron que el máximo valor del momento torsor del motor fue de 382 Nm y se alcanza para una frecuencia de rotación de 1329 rpm con un 26% de etanol añadido a la mezcla. Esta combinación de niveles obtenida se encuentra fuera de la región analizada.

La Figura 3.2 muestra la gráfica de la superficie de respuesta estimada y sus correspondientes curvas de nivel para la variable coeficiente de adaptabilidad del motor.

Como fue mencionado con anterioridad, el coeficiente de adaptabilidad del motor es proporcional al momento torsor de éste, con lo cual el máximo valor de este coeficiente también se alcanza para una frecuencia de rotación del motor de 1329 rpm con un 26 % de etanol añadido a la mezcla. El valor máximo fue de 1,3912.

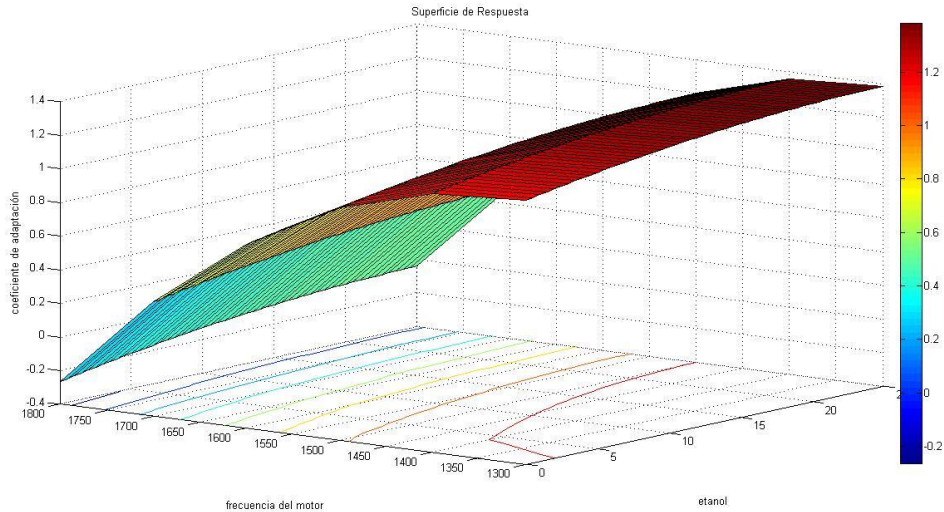


Figura 3.2 Superficie de respuesta estimada y curvas de nivel para la variable coeficiente de adaptabilidad del motor

La Figura 3.3 muestra la gráfica de la superficie de respuesta estimada y sus correspondientes curvas de nivel para la variable gasto específico de combustible.

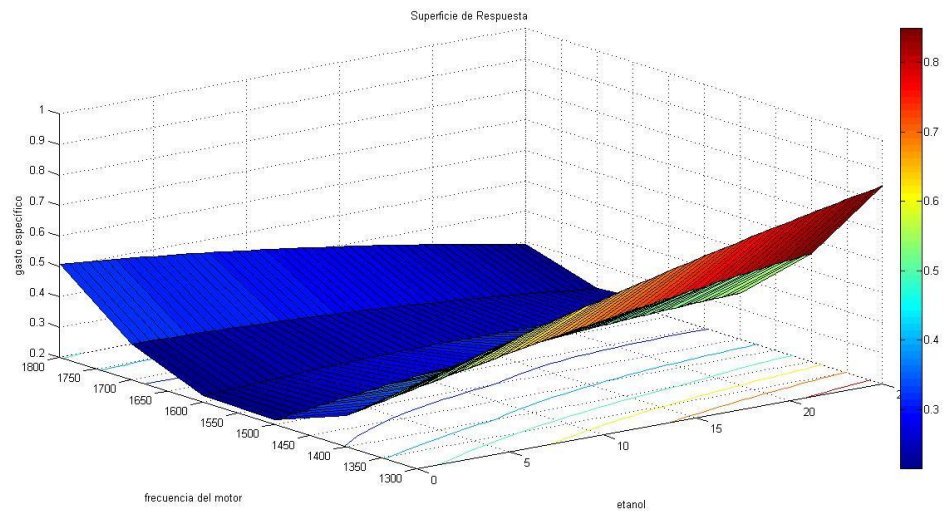


Figura 3.3 Superficie de respuesta estimada y curvas de nivel para la variable gasto específico de combustible

La gráfica sugiere que al aumentar la frecuencia de rotación del motor y los niveles de etanol se obtienen valores bajos del gasto específico de combustible. Los valores más altos del gasto se alcanzan para valores bajos y

altos de la frecuencia de rotación del motor y los porcentos de etanol añadidos a la mezcla, respectivamente.

La expresión de la superficie de respuesta ajustada para el gasto específico de combustible es:

$$ge = 11,163 + 0,078x_1 - 0,014x_2 - 0,00012x_1^2 + 0,0000045x_2^2 - 0,000046x_1x_2$$

donde x_1 y x_2 representan los niveles de etanol y frecuencia de rotación del motor respectivamente.

En el análisis estadístico realizado a esta variable se obtuvo un coeficiente de determinación inferior al 70% ($R^2=68,23\%$); sin embargo, se consideró realizar el correspondiente análisis matemático.

En este caso se obtiene la presencia de un punto de silla en la superficie ajustada cuyo valor es de 0,2492 L/kWh. Este valor se obtiene a 1611 rpm con un 13% de etanol en la mezcla. Esta combinación se encuentra dentro de la región analizada.

La Figura 3.4 muestra la gráfica de la superficie de respuesta estimada y sus correspondientes curvas de nivel para la variable potencia efectiva del motor.

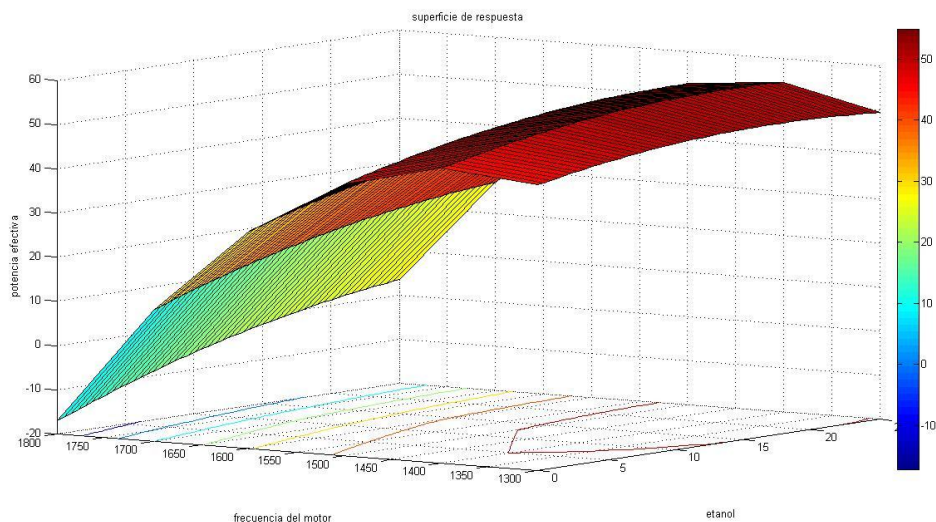


Figura 3.4 Superficie de respuesta estimada y curvas de nivel para la variable potencia efectiva del motor

La superficie sugiere que los mayores valores de la potencia efectiva del motor se alcanzan a bajas revoluciones por minuto y altos porcentos de etanol añadido a la mezcla.

También se observó una tendencia a cero en la potencia efectiva del motor cuando a medida que aumenta la frecuencia de rotación. Esta tendencia también la refiere Díaz (2017) quien ajustó polinomios cuadráticos para representar la relación entre la potencia efectiva y la frecuencia de rotación del motor para los cinco niveles de porcentos de etanol considerados en la mezcla diésel – etanol.

La expresión de la superficie de respuesta cuadrática ajustada para la potencia efectiva del motor es:

$$Ne = -640,213 - 0,979x_1 + 0,996x_2 - 0,018x_1^2 - 0,00036x_2^2 + 0,0012x_1x_2$$

donde x_1 y x_2 representan los niveles de etanol y frecuencia de rotación del motor respectivamente.

De las condiciones necesaria y suficiente para la existencia de puntos extremos en la superficie se obtuvo un valor máximo de 55,0219 kW para la potencia efectiva del motor. Este valor se logra para 1417 rpm y un 21% de etanol en la mezcla. Sin embargo, Díaz (2017) obtuvo valores altos de la potencia efectiva del motor a 1530 rpm con 25% de etanol en la mezcla.

La combinación obtenida para el valor máximo se encuentra dentro de la región en estudio.

La Figura 3.5 muestra la gráfica de la superficie de respuesta estimada y sus correspondientes curvas de nivel para la variable consumo horario de combustible del motor.

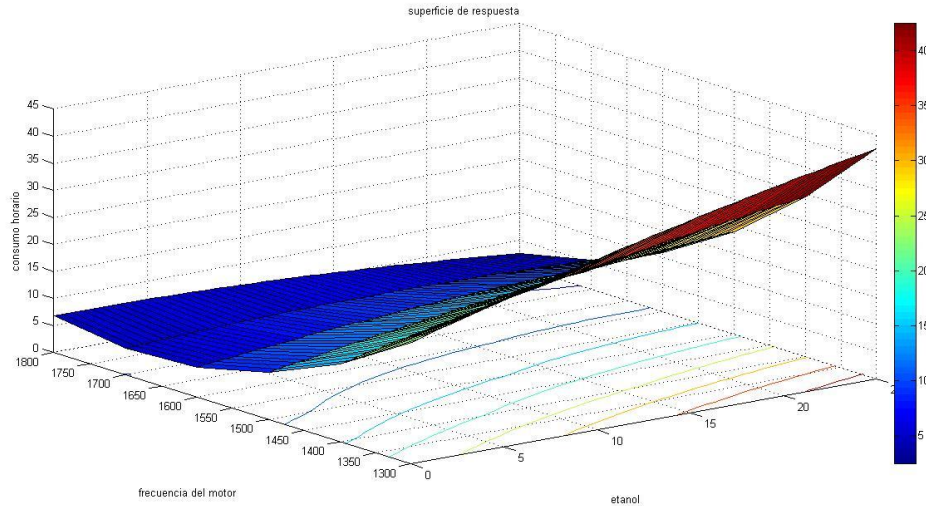


Figura 3.5 Superficie de respuesta estimada y curvas de nivel para la variable consumo horario de combustible

La superficie ajustada muestra que los valores más bajos del consumo horario de combustible se logran a altas revoluciones por minutos y altos porcentos de etanol añadido a la mezcla en el rango de los niveles considerados de los factores. Los valores altos del consumo horario se evidencian para bajas revoluciones por minuto. Estos resultados coinciden con lo reportado por Díaz (2017).

La expresión de la superficie cuadrática de respuesta ajustada para el consumo horario de combustible es:

$$Gh = 358,18 + 3,51x_1 - 0,42x_2 - 0,007x_1^2 + 0,00012x_2^2 - 0,0019x_1x_2$$

donde x_1 y x_2 representan los niveles de etanol y frecuencia de rotación del motor respectivamente.

Para esta superficie, las condiciones necesaria y suficiente de existencia de extremos arrojaron la presencia de un punto de silla de valor 5,9 L/h que se alcanza a 1739 rpm y un 8% de etanol añadido a la mezcla. Esta combinación se encuentra dentro de la región en estudio.

Resulta de particular interés del especialista evaluar el comportamiento de los indicadores analizados a altas frecuencias de rotación del motor al variar los porcentos de etanol añadidos a la mezcla, por ejemplo, para 2000 rpm.

Al evaluar las expresiones de las superficies cuadráticas de respuesta a una frecuencia de rotación del motor de 2000 rpm se evidenció el comportamiento de los indicadores considerados al variar los porcentos de etanol añadidos a la mezcla. La Tabla 3.6 recoge los resultados obtenidos en este análisis.

Tabla 3.6 Valores de las variables respuestas consideradas a una frecuencia de rotación del motor de 2000 rpm

	0	10	15	20	25
Mt (Nm)	-478.74	-441.4685	-429.0766	-420.8474	-416.7807
KtMt	-1.7409	-1.6054	-1.5603	-1.5304	-1.5156
Gh (L/h)	18.2230	13.6194	10.7899	7.6086	4.0755
ge (L/kWh)	1.611	0.9997	0.9096	0.8131	0.7103
Ne (Kw)	-92.3570	-78.8972	-73.5269	-69.0630	-65.5056

Fuente: Elaboración propia

Se observa que al aumentar los porcentos de etanol en la mezcla a 2000 rpm aumentan los valores del momento torsor, coeficiente de adaptabilidad y la potencia efectiva del motor; sin embargo, disminuyen los valores del gasto específico y del consumo horario de combustible.

Las gráficas de las superficies de respuesta ajustadas evidencian que a altas revoluciones por minuto y altos porcentos de etanol añadidos a la mezcla se observan valores mínimos del momento torsor del motor. También para esta tendencia resultan los valores más bajos del gasto específico y del consumo horario de combustible.

De acuerdo con lo observado, se recomienda que las mezclas diésel-etanol sean empleadas en motores de combustión interna diésel rápidos que respondan al ciclo teórico de Sabathé.

Para el desarrollo de la agricultura se utilizan varias máquinas que funcionan con motores de combustión interna diésel rápidos que responden al ciclo teórico de Sabathé. Ejemplo de ellas son:

- Bombas de agua para riego
- Generadores de electricidad
- Motobombas en sistemas de fumigación
- Pulverizadoras y asperjadoras agrícolas

La Figura 3.6 muestra algunas de estas máquinas.



Figura 3.6 Ejemplo de máquinas que funcionan con motores diésel rápido empleadas en la agricultura

Estas mezclas diésel-etanol también pueden ser empleadas en motores de autos ligeros como Peugeot, Mercedes – Benz y Hyundai.

De los resultados obtenidos del correspondiente análisis estadístico-matemático realizado a los indicadores de los motores de combustión interna diésel, se propone la ejecución de una segunda etapa experimental con base en la Metodología de Superficie de Respuesta.

3.3 Propuesta de acciones Estadístico - Matemáticas para la ejecución de una segunda etapa experimental

Para la ejecución de una segunda etapa experimental se establecen criterios con base en la Metodología de Superficie de Respuesta de acuerdo a lo aportado por Box y Wilson (1951), Guerra (1980), Cochran y Cox (1999) y, de particular interés, lo aportado por Kuehl (2001) para experimentos con mezclas. En el experimento analizado en la investigación, de acuerdo a la experiencia acumulada por el investigador principal del proyecto, se conformó un Factorial 5^2 de acuerdo a las combinaciones de los niveles de los factores en estudio, lo cual generó un total de 25 tratamientos.

Con basamento en la Metodología de Superficie de Respuesta se pueden valorar posibles ajustes a realizar de los niveles de los factores en estudio para implementar diseños con un menor número de tratamientos; es decir, obtener las combinaciones óptimas de estos niveles mediante nuevos diseños que involucren una cantidad de tratamientos inferior a 25. De los 25 tratamientos iniciales se puede llegar a un intervalo de entre 9 y 15 corridas aproximadamente, y obtener con buena certeza las combinaciones óptimas de los niveles de los factores en estudio así como explicar el efecto que provocan éstos en la respuesta utilizando criterios de simulación probabilística a partir de los datos originados en la región de análisis.

Para involucrar una cantidad de tratamientos inferior a 25 se consideran los siguientes diseños de acuerdo a lo planteado en las tablas 1.3 y 1.4:

- Diseño Factorial 3^2 con dos factores (9 tratamientos),
- Diseño Compuesto Central con dos factores (9 tratamientos),
- Diseño Compuesto Central Rotacional con dos factores (13 tratamientos)

Kuehl (2001) señala los siguientes criterios:

- Cuando se ha identificado la supuesta región de respuesta óptima suele ser necesario explorar la superficie de respuesta en esa región.
- La ecuación de la superficie de respuesta estimada permite al investigador localizar un punto estacionario en la respuesta que puede ser un máximo, un mínimo o un punto de ensilladura.
- Un examen de las curvas de nivel indica qué tan sensible es la variable de respuesta a cada factor y el grado en que éstos la afectan.

En correspondencia con los resultados obtenidos en el análisis estadístico-matemático realizado a los indicadores analizados de los motores de combustión interna diésel se propone lo siguiente:

- Para las variables momento torsor y coeficiente de adaptabilidad del motor se pueden valorar posibles ajustes en los niveles de los factores en estudio e implementar uno de los diseños mencionados con anterioridad que involucre una cantidad de tratamientos inferior a 25. Lo anterior se

basa en que la combinación óptima obtenida de los niveles de los factores en estudio se encuentra fuera de la región analizada.

- Para la variable gasto específico de combustible se obtuvo los valores bajos de ésta al aumentar los niveles de los factores en estudio a partir de 1611 rpm y un 13% de etanol añadido a la mezcla. Se sugiere explorar en la región la dirección del óptimo e implementar uno de los diseños propuestos.
- Para la variable potencia efectiva del motor la combinación óptima de los niveles de los factores se encontró dentro de la región en estudio (1417 rpm y 21% de etanol añadido a la mezcla). Se sugiere implementar un Diseño Compuesto Central o un Diseño Compuesto Central Rotacional para dos factores que involucran 9 y 13 tratamientos, respectivamente.
- Para la variable consumo horario de combustible los valores óptimos de ésta se alcanzaron al aumentar las revoluciones por minuto y los porcentos de etanol añadidos a la mezcla a partir de 1739 rpm y 8% de etanol. Por tanto, se sugiere explorar la superficie cuadrática de respuesta en esta región e implementar uno de los diseños propuestos.
- Las propuestas de acciones en cada caso, deben culminar con la comparación de los resultados obtenidos con las nuevas propuestas y los resultados obtenidos en los experimentos originales, para establecer criterios estadístico–matemáticos y metodológicos para otras investigaciones.

CONCLUSIONES

Como resumen de todos los aspectos analizados, evaluados y validados con las herramientas estadístico - matemáticas en relación con la aplicación de elementos de la Metodología de Superficie de Respuesta, se concluye que:

- Los referentes teórico - metodológicos relacionados con la Metodología de Superficie de Respuesta y sus aplicaciones en procesos agrarios y en particular de mezclas, así como los relacionados con la determinación de los indicadores de los motores de combustión interna diésel, aportaron valiosos elementos en el desarrollo del trabajo.
- Los modelos de las superficies cuadráticas obtenidas mostraron un buen ajuste de acuerdo a los criterios de bondad de ajuste considerados y cumplieron con los supuestos teóricos establecidos de los errores.
- Las condiciones necesaria y suficiente para la existencia de puntos estacionarios en los modelos de las superficies cuadráticas obtenidas permitieron explorar la existencia de puntos estacionarios (máximos y de ensilladura).
- Las gráficas de los modelos de las superficies cuadráticas de respuesta obtenidas evidenciaron que a altas revoluciones por minuto y altos porcentos de etanol añadido a la mezcla diésel-etanol se observan valores mínimos del momento torsor del motor, del gasto específico y del consumo horario de combustible.
- Las mezclas diésel-etanol deben ser empleadas en motores de combustión interna diésel rápidos que respondan al ciclo teórico de Sabathé.
- En la propuesta realizada para una segunda etapa experimental se consideró explorar los modelos de las superficies de respuesta en la región óptima obtenida y se incorporan diseños experimentales que involucran una cantidad de tratamientos inferior a 25, para hacer propuestas estadístico-matemáticas con experimentos con menos tratamientos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que las mezclas diésel-etanol sean aplicadas en motores de combustión interna diésel rápidos que respondan al ciclo teórico de Sabathé que resultan de utilidad en labores culturales en la agricultura.
- Se propone la ejecución de una segunda etapa experimental donde se exploren las combinaciones óptimas de los niveles de los factores en estudio con la incorporación de diseños que involucren una menor cantidad de tratamientos, con su correspondiente aporte económico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agarwal, AK. 2007, 'Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines', *Journal Progress in Energy and Combustion Science*, vol.33, n.3, pp. 233-271, ISSN 0360-1285.
2. Aguilar, N 2007, 'Bioetanol de la caña de azúcar', *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol.11, n.3, pp. 25-39, ISSN 0188789-0.
3. Anojin, U. y Sajarov, A. 1970. Manual de tractorista. Editorial "Mir" Moscú. 487p.
4. Aredo, V, Velásquez, L, Narro, O y Domínguez, R 2014, 'El Método de Superficie de Respuesta y el Modelamiento Difuso en el desarrollo de una galleta con semillas de chía (*Salvia Hispánica L.*)', *Agroindustrial Science*, vol. 4, pp. 27-34.
5. Bradley, N 2007, 'The Response Surface Methodology', Master of Science in Applied Mathematics & Computer Science, Indiana University of South Bend, Indiana.
6. Box G. 1954. The Exploration and Explotation of Response Surface: Some General considerations and Examples. *Biometrics* 10:16-60.
7. Box G.; P. V. Youle. 1955. The Explorations and Explotation of Response Surface: An example of the link Between the Fitted Surface and the Basic Mechanism of the System. *Biometrics* 11:287-322.
8. Box G.; J. S. Hunter. 1957. Multifactor experimental Design for exploring response surfaces. *J. R. Statis. Soc., Serie B.* 13(1): 195-241.
9. Box G.; N. R. Draper. 1959. A Basic for the selection of a Response Surface Design. *J. Amer. Statist. Assoc.* 54:662-654.
10. Box, G. y Wilson, B 1951, 'On the Experimental Attainment of Optimum Conditions', *J.R. Statis. Soc. Serie B* 13:1-45.
11. Camarillo, JA 2011, 'Estudio de la combustión de un motor monocilíndrico de ignición alimentado con mezclas gasolina-etanol anhidro e hidratado a distintas concentraciones', Maestro en Ingeniería Energética, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

12. Chacín, FL 1998, *Análisis de Regresión y Superficie de Respuesta*, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela.
13. Cochran, WG y Cox GM 1999, *Diseños Experimentales*, 2da. Edición, Editorial Trillas, México.
14. Contreras, MJ, Baesler, F y Maldonado, L 2010, 'Optimización de las operaciones portuarias mediante simulación y Metodología de Superficie de Respuesta', *Ingeniería Industrial*, vol. 9, n.2, pp. 73-92, ISSN 0717-9103.
15. Crawley, MJ 2007, *The R Book*, 2da edición, Imperial College London at Silwood Park, UK.
16. Del Ángel, MTS, García, PA, Lagunes, LMG, García, RA y Cabrera, EGC 2015, 'Aplicación de Metodología de Superficie de Respuesta para la degradación de naranja de metilo con TiO₂ SOL-GEL sulfatado', *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 31, n.1, pp. 99-106.
17. Díaz, S 2017, 'Evaluación de los parámetros principales del motor diésel al emplearse mezclas diésel - etanol', Ingeniera Agrícola, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Agraria de La Habana, Cuba.
18. Díaz, XJC 2017, 'Caracterización y optimización de una bandeja biodegradable a partir de maíz, papa, soya y glicerol por el método de termoprensado', Ingeniera en Agroindustria Alimentaria, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
19. Gonzáles, R 1993. *Explotación del Parque de Maquinarias*, Editorial Félix Varela, ISBN 959 - 07-0026, Cuba.
20. González, W, Chacín, F, García, J, Ascanio, M y Cobo, M 2006, 'Bloques incompletos en los diseños de superficie de respuesta compuestos de Box y sus aplicaciones agronómicas', *Revista de la Facultad de Agronomía*, vol. 23, n.1, pp. 96-113, ISSN 0378-7818.
21. GREENPEACE, CC 2010, 'Cambio Climático: futuro negro para los glaciares', Buenos Aires, Argentina.
22. Guerra, CW 1980, 'Relación Modelo – Diseño de tratamientos en la determinación de las dosis óptimas de fertilizantes con experimentos de campo en Cuba', Doctora en Ciencias Agrícolas, Instituto de Suelos y Agroquímica "Nikola Pushkarov", Sofía, Bulgaria.

23. Guerra, CW; Cabrera, A y Fernández, L 2003, 'Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica', *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 37, núm. 1, pp. 3-10.
24. Gujarati, DN y Porter, DC 2009, *Econometría*, 5ta Edición, McGraw-Hill Education, México.
25. Jovaj, MS y Mázlov, GS. 1973. Motores de automóviles. Editorial "Pueblo y Educación". Moscú.
26. Kralob, CM y Antono, VN. 1980. Estructura, mantenimiento térmico y reparación de automóviles y motocicletas. Editorial Escuela Superior. Moscú. 320p.
27. Kuehl, RO 2001, *Diseños de Experimentos*, 2da Edición, Editorial Thomson Learning, México.
28. Lenth, R.V 2009, 'Response - Surface Methods in R, Using rsm'. *Journal of Statistical Software*, 7(32), <http://www.jstatsoft.org/>
29. Lenth, RV 2012, 'Surface Plots in the rsm Package', Version 2.00, December 3, <http://www.stat.uiowa.edu/~rlenth/>
30. Lenth, RV 2016, 'Package 'rsm': Response Surface Analysis . Package and RSM methodology', Version 2.8. October 16, <http://www.stat.uiowa.edu/~rlenth/>
31. López, E y Ruiz, M 2011, 'Análisis de datos con el Modelo Lineal Generalizado. Una aplicación con R', *Revista Española de Pedagogía*, año LXIX, núm. 248, enero – abril, pp. 59-80.
32. López, RP 1988, *Diseño estadístico de experimentos*, Editorial Científico-Técnica, La Habana, Cuba.
33. Matlab R2013a. 2013.
34. Melo, EAE, Sánchez, YB, Ferrer, NF y Ferrer, NF 2012, 'Evaluación de un motor de encendido por chispa trabajando con mezclas etanol-gasolina', *Revista de Ingeniería Energética*, vol.33, n.2, pp. 94-102, ISSN 1815-5901.
35. Milde, LB, Valle, CU, Rybak, A, Oliveira, C y González, KG 2009, 'Metodología de Superficie de Respuesta para optimizar panificado libre de gluten con grasa, huevo y leche', *Rev. Cienc. Tecnol.*, vol.11, n.11.
36. Miranda, I, Arévalo, J y Hidalgo, LD 2013, 'Metodología de Superficie de Respuesta para evaluar estabilidad en almacén de un agente de control biológico', *Revista de Protección Vegetal*, vol.28, n.3, pp. 224-228.

37. Montgomery, D. 2005. Design and Analysis of Experiments: Response surface method and designs. New Jersey: John Wile and Sons, Inc.
38. NC ISO- 2288. 2004. Norma cubana para máquinas agrícolas y forestales. Tractores agrícolas. Toma de fuerza. Ensayos del motor.
39. Pancratov, CP. 1979. Motores de combustión interna de automóviles, tractores y su explotación. Editorial" Escuela Superior" Moscú. 296p.
40. Piloto, R, Sierens, R, Verhelst, S y Ferrer, N 2008, 'Evaluación del funcionamiento de motores de combustión interna trabajando con biodiesel', *Revista de Ingeniería Mecánica*, vol. 11, núm. 3, pp. 33-38, ISSN 1815-5944.
41. Rodríguez, JI 2018, 'Evaluación del rendimiento de obtención del biodiesel mediante el proceso de transesterificación de aceite de soja usado por el método de Superficie de Respuesta', Ingeniero Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.
42. Sánchez, EMG 2016, 'Optimización del proceso osmo-convectivo en la deshidratación del mango (*Mangifera indica*)', Ingeniera en Agroindustria Alimentaria, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
43. Sandoval, GKA 2016, 'Optimización de la deshidratación osmótica de cilindros de manzana (*Malus domestica* B.) por la Metodología de Superficie de Respuesta', Ingeniera Química, Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú.
44. Soca, JR. 1987. Cálculo termodinámico con elementos de investigación de los motores de tractores y automóviles. Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de la Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez", Facultad de Mecanización.
45. Soca, JR., Rivera M. y Trejo JM. 1994. Teoría del motor de combustión interna. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
46. STATGRAPHICS Centurión XVI. 2013.
47. Torres, E, Blancas, A, Vázquez, A, Cristiani, E, Mayorga, L, y Sánchez, NE 2016, 'Evaluación de sedimentos de pulque (xaxtle) como cultivo iniciador para obtener un producto de panificación de bajo índice glucémico', *Agrociencia* 50 (2): 183 - 200.

