



# Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos

Alexander Alberto Correa Espinal<sup>1</sup>  
Juan Miguel Cogollo Flórez<sup>2</sup>  
Juan Carlos Salazar López<sup>3</sup>

*Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos*

***Evaluation of the effect efficient driving has on fuel consumption in heavy load vehicles by the use of experimental design***

***Avaliação do efeito da condução eficiente no consumo de combustível em veículos de transporte de carga pesado usando desenho de experimentos***

---

<sup>1</sup> Ph. D en Estadística e Inv. Operativa, profesor Escuela de Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. <sup>2</sup> Estudiante de Maestría en Ingeniería Administrativa, Escuela de Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, [jmcogollof@unal.edu.co](mailto:jmcogollof@unal.edu.co). <sup>3</sup> Estudiante de Maestría en Ingeniería Administrativa, Escuela de Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, [jcsalazarl@unal.edu.co](mailto:jcsalazarl@unal.edu.co)

Correspondencia: Alexander Correa Espinal, email: [alcorrea@unal.edu.co](mailto:alcorrea@unal.edu.co)

Artículo recibido: 15/09/2010; Artículo aprobado: 03/12/2010

## RESUMEN

**Introducción.** La conducción eficiente es una técnica que contribuye a reducir el consumo de combustible y las emisiones al medioambiente, y mejora la seguridad en la conducción. Es necesario evaluar y cuantificar la contribución de las técnicas de conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada. **Objetivo.** Evaluar algunos de los factores presentes en la conducción de vehículos de carga pesada que pueden incidir en el consumo de combustible, con el fin de identificarlos y definir posibles acciones de mejora que permitan obtener un ahorro considerable en dicho consumo. **Materiales y métodos.** La unidad experimental correspondió a un viaje ida y regreso en la ruta comprendida entre Medellín y Cartagena con una distancia total de 1,310 Km teniendo como punto de origen y destino la ciudad de Medellín, usando un tractocamión marca Kenworth modelo T800 con una capacidad de carga de 35 toneladas. Se usó un diseño factorial  $2^3$  con dos réplicas. Los datos resultantes fueron analizados usando el software *Statgraphics Plus*® 5.0. **Resultados.** Se identificaron como significativos los factores *Mínima*, *Crucero* y *Último cambio* y se determinaron sus respectivos niveles óptimos bajo las condiciones en las que se llevó a cabo el experimento, logrando un incremento de hasta el 22,5% en el rendimiento del combustible si se opera el vehículo en dichos niveles. **Conclusiones.** Los factores significativos explican el 74,02% de la variabilidad presentada en el rendimiento de combustible.

**Palabras clave:** parámetros de conducción, consumo de combustible, experimento, diseño factorial, optimización.

## ABSTRACT

**Introduction.** Efficient driving is a technique that contributes to the reduction of fuel consumption and emissions to the environment, and also increasing safety. It is necessary to evaluate and quantify the contributions of such technique on fuel consumption for heavy load vehicles. **Objective.** To evaluate some of the factors of driving heavy load vehicles that can affect fuel consumption in order to identify them and define actions that help in the search for savings in such a consumption. **Materials and Methods.** The experimental unit was a round trip Medellín-Cartagena-Medellín, with a total distance of 1,310 km in a Kenworth T800 truck that has a load capacity of 35 tons. A  $2^3$  factorial design with two replicas was used and the data obtained were analyzed with a *Statgraphics Plus* © 5.0 software. **Results.** Minimum, Cruise and Last Gear were identified as significant factors and their optimal levels were determined in the conditions under which the experiment was made, achieving a 22,5% increment in the performance of the fuel if the vehicle is operated under those levels. **Conclusions.** Significant factors explain the 74,02% of the variability obtained in the performance of the fuel consumption.

**Key words:** driving parameters, fuel consumption, experiment, factorial design, optimization.

## RESUMO

**Introdução.** A condução eficiente é uma técnica que contribui a reduzir o consumo de combustível e as emissões ao meio-ambiente, e melhora a segurança na condução.

É necessário avaliar e quantificar a contribuição das técnicas de condução eficiente no consumo de combustível em veículos de transporte de ônus pesado. **Objetivo.** Avaliar alguns dos fatores presentes na condução de veículos de ônus pesado que podem incidir no consumo de combustível, com o fim de identificá-los e definir possíveis ações de melhora que permitam obter uma poupança considerável em dito consumo. **Materiais e métodos.** A unidade experimental correspondeu a uma viagem ida e regresso na rota compreendida entre Medellín e Cartagena com uma distância total de 1,310 Km tendo como ponto de origem e destino a cidade de Medellín, usando um trator-caminhão marca Kenworth modelo T800 com uma capacidade de carga de 35 toneladas. Usou-se um desenho fatorial 23 com duas réplicas. Os dados resultantes foram analisados usando o software Statgraphics Plus© 5.0. **Resultados.** Identificaram-se como significativos os fatores Mínima, Cruzeiro e Última mudança e se determinaram seus respectivos níveis ótimos sob as condições nas que se levou a cabo o experimento, conseguindo um incremento de até o 22,5% no rendimento do combustível se se opera o veículo em ditos níveis. **Conclusões.** Os fatores significativos explicam o 74,02% da variabilidade apresentada no rendimento de combustível.

**Palavras importantes:** parâmetros de condução, consumo de combustível, experimento, desenho fatorial, otimização.

## INTRODUCCIÓN

El sistema de transporte es la actividad económica más importante de todos los componentes del sistema logístico de una empresa y representa, en promedio, el 6.5% de las ventas y el 44% de los costos logísticos<sup>1</sup>. En Colombia, según el Ministerio de Transporte<sup>2</sup>, el costo del combustible puede constituir del 46.2% al 63.9% de los costos operativos variables de una flota de transporte terrestre de carga pesada, dependiendo del tipo de terreno donde se lleve a cabo la operación (tabla 1).

La conducción eficiente es una técnica que contribuye a reducir el consumo de combustible, las emisiones al medioambiente y mejora la seguridad en la conducción. La tecnología de los vehículos ha evolucionado de forma significativa, sin embargo, la forma de conducirlos ha permanecido invariable. La conducción eficiente viene a corregir este desajuste, aportando un nuevo estilo de conducción acorde con estas modernas tecnologías<sup>3</sup>; se basa en herramientas operacionales poco monitoreadas y/o controladas que contribuyen a la reducción de los costos de combustible. En los últimos años, las autoridades reguladoras de Estados Unidos han desarrollado políticas y programas para incentivar a los conductores de tractocamiones a disminuir la operación de los vehículos en marcha mínima como una forma de reducir las emisiones y el consumo del combustible Diesel<sup>4</sup>.

Es por ello, que con el fin de evaluar y cuantificar la contribución de las técnicas de conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada, se diseñó y llevó a cabo un experimento que sirve de referente conceptual para la ampliación de la investigación en el tema, aprovechando la capacidad tecnológica actual de los motores que facilita el monitoreo y control de las variables indicadoras de la operación del vehículo.

**Tabla I. Distribución de costos operativos variables de una flota de transporte terrestre de carga pesada en Colombia según el tipo de terreno de operación**

Componente	Tipo de terreno		
	Plano (%)	Ondulado (%)	Montañoso(%)
Combustible	46.2	54.9	63.9
Llantas	17.8	14.9	11.9
Lubricantes	4.5	3.8	3.0
Filtros	1.6	1.3	1.1
Mantenimiento	24.0	20.1	16.1
Lavado y engrase	2.2	1.8	1.5
Imprevistos	3.8	3.1	2.5

Fuente: Ministerio de Transporte<sup>2</sup>

## Consumo de combustible

Un vehículo está constituido por cientos de partes que cumplen una función definida, por donde se producen pérdidas energéticas. Tomando en cuenta la termodinámica de la combustión y la fricción, sólo un sexto de la energía del combustible se emplea realmente para el accionamiento del vehículo sobre la carretera o mover accesorios útiles. El resto de la energía se pierde en el motor en incapacidades de la línea de transmisión y marcha en vacío<sup>5</sup>.

Según Komor<sup>6</sup> y De Vlieger<sup>7</sup>, los principales factores que influyen en el consumo de energía en vehículos de transporte de carga pesada son:

- La eficiencia energética de los motores
- La manera de operación (factores de carga, velocidad, marcha en vacío)
- El ambiente de operación (congestión, infraestructura vial)
- La mezcla de vehículos (pequeños vs. grandes, urbano vs. rural)
- Las cargas (peso, altura vs. densidad, contenedores vs. carga a granel)

Experimentos realizados por Wang *et al.*<sup>8</sup>, evaluando la influencia de los patrones de conducción sobre el consumo de combustible, mostraron que la tasa de consumo de combustible por unidad de tiempo y la velocidad crucero tienen una correlación positiva; asimismo, la tasa de consumo se incrementa significativamente cuando los vehículos son acelerados, y cambia poco durante la desaceleración.

El aprovechamiento de las tecnologías de rendimiento de combustible y la optimización del comportamiento vial puede aumentar el ahorro de combustible. Una forma de lograr un menor consumo es mantener una velocidad lo más constante posible, similar a la de los vehículos que preceden para evitar interferencias en el movimiento, frenadas y aceleraciones innecesarias. Otras medidas son: limitar

al máximo las aceleraciones, bien sean positivas o negativas, frenar lo menos posible, planificar adecuadamente el uso del vehículo, reducir el tiempo de parada del vehículo con el motor encendido, no llenar el tanque de combustible hasta que desborde, no llevar cargas innecesaria y no utilizar el aire acondicionado y las luces cuando no sea necesario<sup>5,9</sup>.

## Conducción eficiente

La conducción eficiente es un procedimiento integral para la operación de un vehículo, orientado a lograr un mínimo consumo de combustible, llantas y repuestos en cualquier tipo de carretera o condiciones de tráfico<sup>10</sup>. Está basada en procedimientos que especifican la potencia, torque y velocidad para operar el motor en los límites operacionales óptimos, conocidos como “zona verde”.

La conducción eficiente requiere un conocimiento detallado de los elementos del tren de potencia del vehículo: motor, transmisión, diferencial y llantas. Con la información presente en las curvas características del motor se determinan los máximos valores de potencia, torque y consumo específico de combustible con sus correspondientes números de revoluciones por minuto (RPM) del motor<sup>11</sup>.

Aunque algunas de las técnicas de conducción eficiente pueden aplicarse a todos los vehículos, en realidad, están concebidas para vehículos de fabricación posterior al año 1994 aproximadamente, los cuales poseen sistemas de inyección electrónica de combustible. La conducción eficiente ofrece importantes beneficios a los conductores de vehículos privados, camiones y autobuses, a través del ahorro en costos, mejora de la seguridad, mejora del confort en la conducción y reducción de sus emisiones medioambientales<sup>5</sup>.

Experimentos controlados realizados en conductores de vehículos de carga pesada con diferentes estilos de conducción (agresivo, normal y técnico) han arrojado diferencias significativas en el consumo de combustible<sup>12</sup> y en las emisiones de partículas<sup>13</sup> entre cada uno de ellos, siendo menores el consumo y las emisiones en la conducción técnica o eficiente. Esto reafirma la necesidad de incentivar los buenos hábitos de la conducción eficiente en los sistemas de transporte moderno.

Los medidores e indicadores son fundamentales para la conducción eficiente. Durante y después del viaje, los conductores y personal de la empresa pueden utilizar diversos sistemas para verificar el consumo de combustible y los parámetros bajo los cuales se operó el vehículo durante todo el recorrido. Dispositivos como los económetros, computadores de a bordo, dispositivos “*cruise control*” (control programable de velocidad crucero) y limitadores de velocidad son de gran utilidad para el ahorro de combustible y control del consumo<sup>3,9</sup>.

## MATERIALES Y MÉTODOS

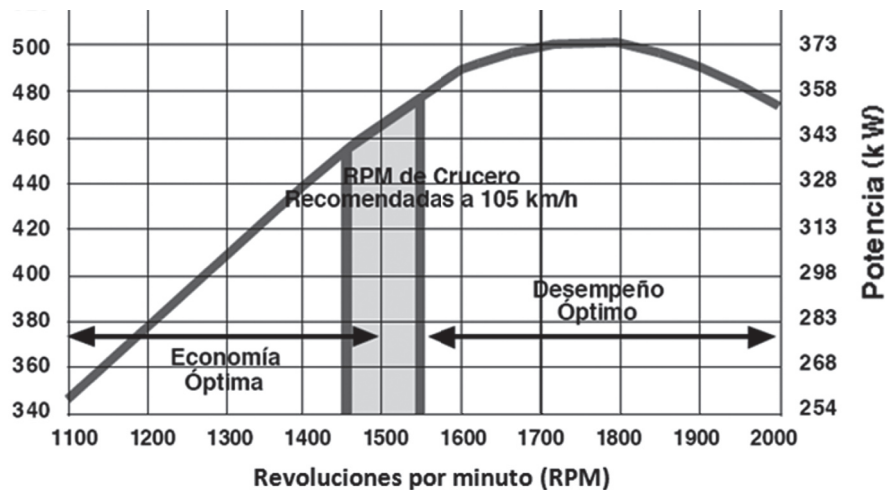
Para el desarrollo del experimento se usaron los pasos propuestos por Montgomery<sup>14</sup>: definición del problema, objetivos del experimento, selección de factores

y niveles, selección de la variable respuesta, selección del diseño experimental y control de la ejecución.

## Definición del problema

El consumo de combustible puede representar hasta el 63.9% de los costos operativos variables de una flota de transporte terrestre de carga pesada en Colombia (tabla 1); por lo tanto, es un factor crítico en programas de mejoramiento de la productividad en las empresas dedicadas a este tipo de negocios.

En los vehículos de transporte de carga de última tecnología, los motores son electrónicos y muy flexibles en su operación, por lo que las habilidades y destrezas del operador tienen gran incidencia en el desempeño del motor y, por ende, en el rendimiento del combustible. Esto se puede observar en la curva de desempeño de un motor, como la mostrada en la figura 1<sup>15</sup>, donde se nota que si se opera en un rango de 1,100 a 1,500 RPM se obtiene economía óptima en el combustible, y si se opera entre 1,500 y 1,800 RPM se obtiene un desempeño óptimo en potencia, pero con mayor consumo de combustible.



**Figura 1. Curva de desempeño de motor Cummins ISX 475**

Fuente: Cummins Engine Company<sup>15</sup>.

Los motores modernos están dotados de sistemas de monitoreo de las principales variables que miden su funcionamiento: temperatura del motor, velocidad, número de revoluciones por minuto, consumo de combustible y variables que miden la forma de conducir el vehículo: control de crucero, tiempo del motor encendido sin desplazamiento del vehículo (mínima), tiempo en último cambio, entre otras.

Generalmente, estos datos suministrados por los motores no son aprovechados para obtener información que permita optimizar el funcionamiento de la operación en cuanto a consumo de combustible. Algunas empresas descargan los datos y establecen niveles operativos empíricos para evaluar la operación del vehículo y el desempeño del operador, pero sin utilizar el enfoque del diseño experimental.

## Objetivos del experimento

- Identificar los parámetros de conducción o factores que influyen en el consumo de combustible de un motor electrónico Diesel (ISX 475) usado en vehículos de transporte de carga pesada.
- Determinar los niveles adecuados de los parámetros de conducción que maximicen el rendimiento del combustible en un motor electrónico Diesel (ISX 475) usado en vehículos de transporte de carga pesada.

## Selección de factores y niveles

La selección de los factores se hizo teniendo como referencia los estudios previos de El-Shawarby<sup>16</sup>, Wahlberg<sup>17</sup> y Larsson y Ericsson<sup>18</sup>, quienes encontraron que el rendimiento de combustible de un vehículo depende, además de su diseño y contenido, del comportamiento del conductor, reflejado en factores como cambios en las velocidades de crucero, marcha mínima y aceleración frecuente. De igual manera, Wang et al.<sup>8</sup> demostraron que la velocidad crucero y la tasa de aceleración son factores que tienen una correlación positiva con la tasa de consumo de combustible.

Considerando estos referentes, se tomaron los datos de una empresa de transporte de carga pesada recopilados en el año 2009 y, luego de realizar un análisis de correlación entre los niveles de varios factores y el rendimiento de combustible obtenido en cada combinación, fueron seleccionados como factores del estudio los siguientes parámetros de conducción:

- **Mínima:** porcentaje de tiempo que permanece encendido el motor con velocidad cero, es decir, sin desplazamiento. Coeficiente de correlación = -0.4351.
- **Crucero:** porcentaje de tiempo que opera el motor controlando automáticamente la velocidad del vehículo sin intervención del operador. Coeficiente de correlación = 0.2280.
- **Último cambio:** porcentaje de tiempo que opera el vehículo en el último cambio. Coeficiente de correlación = 0.4260.

Se descartaron los factores *penúltimo cambio* (porcentaje de tiempo que opera el vehículo en el penúltimo cambio) y *velocidad máxima* (porcentaje de tiempo que opera el vehículo en velocidad máxima) dado que presentaron los menores coeficientes de correlación: 0.0725 y -0.0341, respectivamente.

En la tabla 2, se muestran los factores del experimento y sus respectivos niveles. Los niveles *bajo* y *alto* corresponden a los límites inferior y superior, respectiva-

mente, de los intervalos de confianza hallados en el análisis referenciado anteriormente, con un nivel de significancia del 95% para cada uno de los factores.

**Tabla 2. Factores del experimento y sus niveles**

Factor	Unidad de medida	Nivel Bajo	Nivel Alto
Mínima (A)	%	7	13
Crucero (B)	%	12	24
Último cambio (C)	%	10	20

### Selección de variable respuesta

La variable respuesta es el rendimiento del combustible, calculado como la cantidad de kilómetros recorridos por galón de combustible consumido (KPG).

La importancia del rendimiento de combustible como variable respuesta radica en el hecho de que es necesario investigar los efectos de los diferentes factores técnicos y/o operacionales que afectan el consumo de combustible, con el fin de generar estrategias orientadas a reducirlo y, por ende, lograr una significativa reducción en los costos, dado que aproximadamente el 30% de los costos totales en el ciclo de vida de un vehículo de transporte de carga pesada corresponden a los costos de combustible<sup>19</sup>.

### Selección del diseño

Las características del experimento, en el sentido que se necesita investigar el efecto conjunto de varios factores sobre una variable respuesta, conducen a seleccionar un diseño que considere todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores y, asimismo, estudie tanto efectos principales como efectos de interacción, minimizando el costo de la experimentación. Estos requerimientos son satisfechos utilizando un diseño factorial  $2^k$ . Se seleccionó un diseño factorial  $2^3$  con dos réplicas para un total de 16 corridas experimentales. Este número de réplicas es el recomendado por la literatura para el estudio de los siete efectos de interés<sup>14,20</sup>. Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el *software* estadístico comercial *Statgraphics Plus*® 5.0. El análisis de varianza, los gráficos de efectos e interacciones, los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y el gráfico de superficie de respuesta fueron generados con el mismo *software*.

### Ejecución del experimento

La matriz de diseño del experimento con los niveles de cada factor y el orden de ejecución empleado para garantizar la aleatoriedad de los resultados se muestra en la tabla 3. Los niveles de estos factores son controlados a través del módulo electrónico del motor que mide las condiciones de manejo por parte del operador, el cual también permite el monitoreo de la variable respuesta.



La unidad experimental corresponde a un viaje ida y regreso en la ruta comprendida entre Medellín y Cartagena con una distancia total de 1,310 Km teniendo como punto de origen y destino la ciudad de Medellín. El tramo Medellín-Cartagena se hizo con un peso de carga de 20 toneladas y el tramo Cartagena-Medellín, con 35 toneladas.

**Tabla 3. Matriz del diseño factorial 2<sup>3</sup> con dos réplicas y resultados del experimento.**

N°	Orden de ejecución	Factores			Rendimiento (KPG)
		Mínima (%)	Crucero (%)	Último Cambio (%)	
1	7	7	12	10	8.34
2	11	13	12	10	6.85
3	9	7	24	10	9.33
4	14	13	24	10	8.12
5	1	7	12	20	8.61
6	16	13	12	20	7.97
7	4	7	24	20	9.26
8	2	13	24	20	8.90
9	15	7	12	10	7.84
10	12	13	12	10	7.38
11	3	7	24	10	8.86
12	8	13	24	10	7.03
13	5	7	12	20	9.53
14	13	13	12	20	8.18
15	10	7	24	20	11.20
16	6	13	24	20	9.16

Con el fin de evitar la interferencia de factores de ruido en el desarrollo del experimento, las corridas se realizaron usando un solo tipo de vehículo y un solo operador que se limitó a seguir las combinaciones de niveles de los factores para cada corrida según el orden de ejecución establecido en la tabla 3.

El vehículo utilizado es un tractocamión marca Kenworth modelo T800 con un motor Cummins modelo ISX 475 de 475 BHP y una capacidad de carga de 35 toneladas, el cual tiene un rendimiento de combustible promedio de 8.27 KPG en condiciones de manejo no controladas. Se garantizaron condiciones técnico-mecánicas uniformes en todos los recorridos (calibración de inyectores, presión de inflado de llantas, alineación y balanceo, lubricación y calidad del combustible).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados iniciales

En el análisis de los resultados de un diseño factorial es erróneo establecer conclusiones definitivas o definir modelos de comportamiento de la variable de respuesta con un análisis único de los resultados. Por ello, debe llevarse a cabo un análisis secuencial donde, en cada fase, se eliminen y trasladen al error los efectos que no son significativos y lograr un modelo final con las fuentes de variación claramente significativas.

Los resultados del experimento en cuanto al rendimiento de combustible (KPG) obtenido en cada una de las corridas se muestran en la tabla 3 y fueron posteriormente analizados usando *Statgraphics Plus*® 5.0.

En la gráfica de probabilidad normal o de Daniel's inicial (figura 2) y en el diagrama de Pareto inicial (figura 3) se nota que resultaron significativos los tres factores estudiados: *mínima* (A), *crucero* (B) y *último cambio* (C), y que las interacciones (AB, BC, AC y ABC) no eran significativas.

Se nota el fuerte impacto en la variable de respuesta ante la variación en los niveles de cada uno de los factores principales, confirmando la significancia de éstos. Estos resultados coinciden con lo expresado en el análisis de varianza inicial (tabla 4), donde también se observa que los siete efectos considerados explican el 64.23% de la variabilidad observada en el experimento (coeficiente de determinación ajustado,  $R^2$ ).

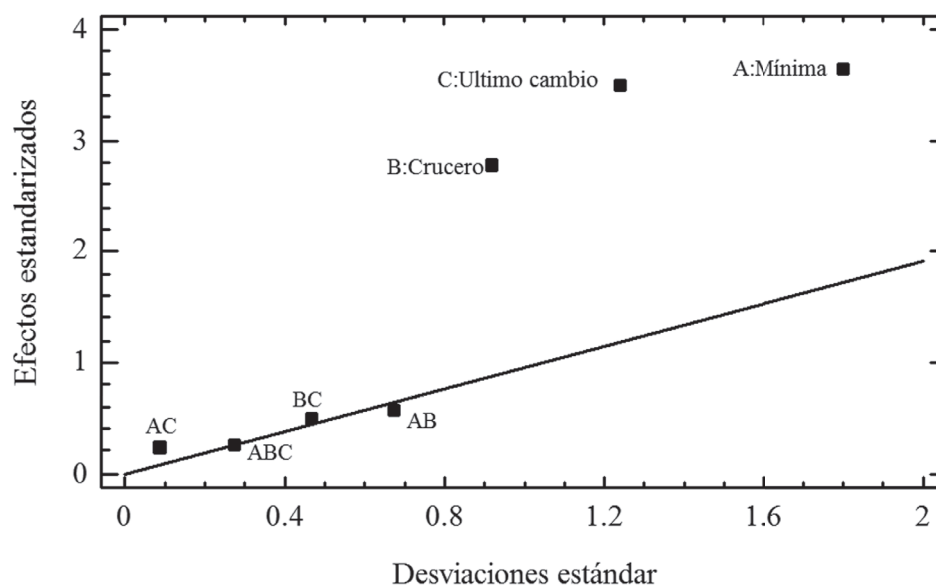


Figura 2. Gráfica de probabilidad normal inicial para rendimiento (KPG)

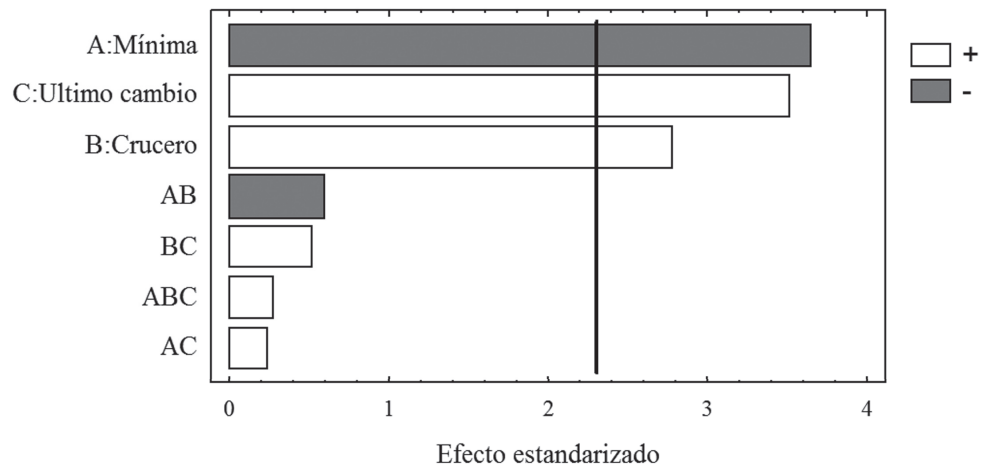


Figura 3. Diagrama de Pareto de efectos inicial

Tabla 4. ANOVA inicial

Analysis of Variance for Rendimiento					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: mínima	5.49902	1	5.49902	13.21	0.0066
B: crucero	3.2041	1	3.2041	7.70	0.0241
C: último cambio	5.13022	1	5.13022	12.32	0.0080
AB	0.140625	1	0.140625	0.34	0.5771
AC	0.0225	1	0.0225	0.05	0.822
BC	0.105625	1	0.105625	0.25	0.6281
ABC	0.0289	1	0.0289	0.07	0.7989
Total error	3.3308	8	0.41635		
Total (corr.)	17.4618	15			

R-squared = 80.9252 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 64.2348 percent

Standard Error of Est. = 0.645252

Mean absolute error = 0.37

Durbin - Watson statistic = 1.9265 (P = 0.4634)

Lag 1 residual autocorrelation = 0.0248289

Los efectos de las interacciones AB, BC, AC y ABC, que resultaron no significativos, son trasladados al error, y sólo se consideran en el análisis final los efectos de los factores A, B y C que son notoriamente significativos.

### Resultados finales

En la gráfica de probabilidad normal final (figura 4), considerando solamente los 3 factores principales, se corroboran los resultados del análisis inicial en cuanto a la significancia de los mismos. El diagrama de Pareto final de los efectos se muestra en la figura 5. El análisis de varianza final (tabla 5) permite obtener un modelo más adecuado para explicar la variabilidad del experimento, dado que sólo contiene términos significativos. Los efectos de los factores considerados (*mínima*, *crucero* y *último cambio*) explican, ahora, el 74.02% de la variabilidad en los resultados del rendimiento de combustible.

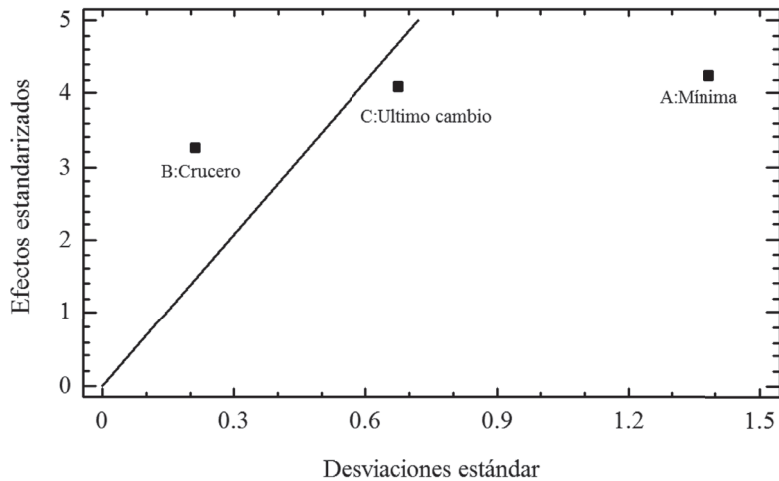


Figura 4. Gráfica de probabilidad normal final

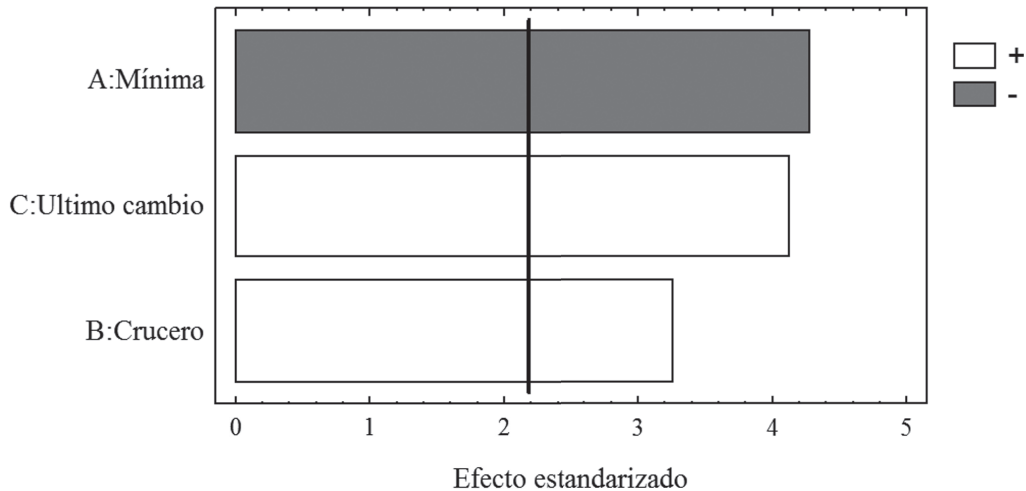


Figura 5. Diagrama de Pareto final

Tabla 5. ANOVA final

<i>Analysis of Variance for Rendimiento</i>					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: mínima	5.49902	1	5.49902	18.19	0.0011
B: crucero	3.2041	1	3.2041	10.60	0.0069
C: último cambio	5.13022	1	5.13022	16.97	0.0014
Total error	3.62845	12	0.302371		
Total (corr.)	17.4618	15			

R-squared = 79.2206 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 74.0258 percent

Standard Error of Est. = 0.549883

Mean absolute error = 0.37

Durbin - Watson statistic = 1.89435 (P = 0.4649)

Lag 1 residual autocorrelation = 0.0400016

## Verificación de los supuestos del modelo

La verificación de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de los residuos del modelo final incluyendo sólo los factores significativos permite validar el desarrollo analítico del experimento. En la gráfica de probabilidad normal de los residuos (figura 6) se nota que éstos tienen un comportamiento normal; asimismo, la prueba de Shapiro-Wilks arrojó un P-value = 0.4609, lo cual indica que no se puede rechazar la hipótesis de normalidad con un nivel de significancia de 5%. En la gráfica de residuos contra predichos (figura 7), se nota que aquéllos tienen una varianza aproximadamente constante.

La Tabla 6 contiene los estadísticos básicos de los residuos, donde se observa que la media muestral es cero. El supuesto de que los residuos tengan media cero se verificó realizando una prueba de hipótesis bilateral a un nivel de significancia del 5% (P-value = 1.0) y examinando que el cero esté contenido en el intervalo de confianza de la media. Adicionalmente, se nota que los coeficientes de asimetría y kurtosis de los residuos se encuentran en el intervalo (-2, 2), lo cual reafirma que éstos poseen una distribución normal.

En la gráfica de residuos frente a orden de ejecución del experimento (figura 8) se nota la independencia de éstos, ya que no existe un patrón de comportamiento específico. Este supuesto se ratifica examinando el P-value obtenido en la prueba de Durbin-Watson (tabla 5).

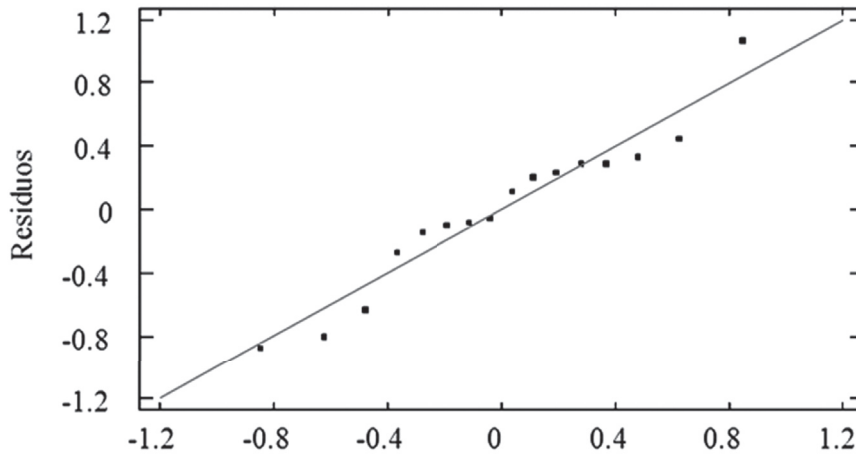


Figura 6. Gráfica de probabilidad normal de los residuos

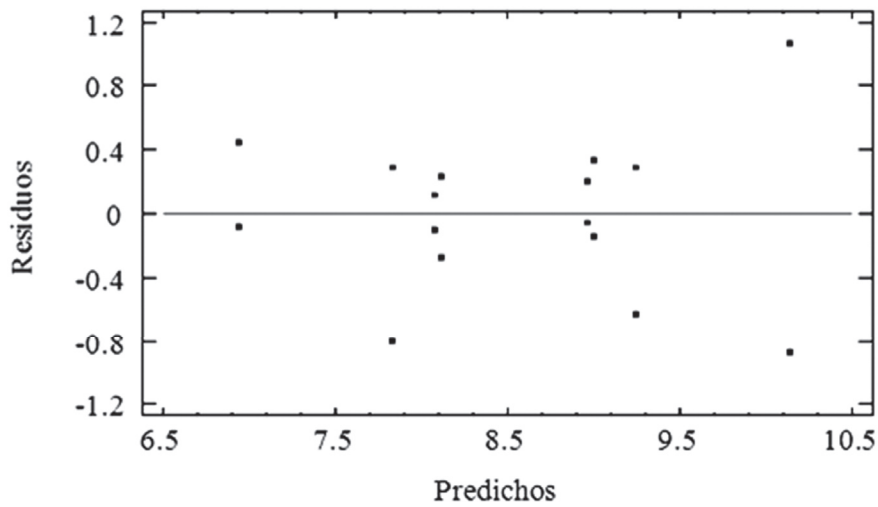


Figura 7. Gráfica de residuos versus predichos

Tabla 6. Estadísticos básicos de los residuos

Estadístico	Estimación
Media	0.0
Intervalo de confianza para la media (95%)	(-0.262078, 0.262078)
Desviación estándar	0.49183
Mínimo	-0.875
Máximo	1.065
Rango	1.94
Coefficiente de asimetría estandarizado	-0.0565956
Coefficiente de kurtosis estandarizado	0.468237

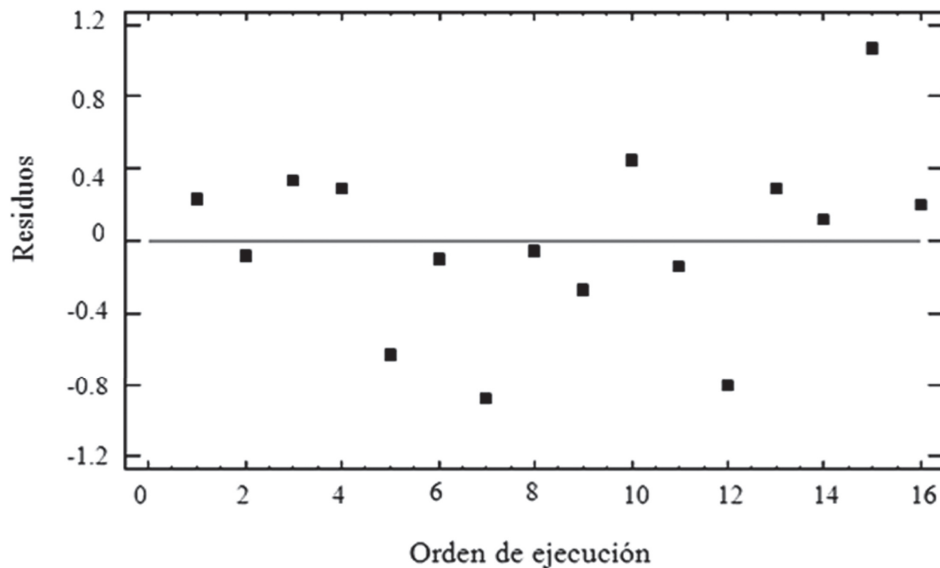


Figura 8. Gráfica de residuos versus orden de ejecución

### Optimización de la variable de respuesta

El análisis de varianza final (tabla 5) tiene asociado un modelo lineal que explica la variabilidad del rendimiento de combustible en un nivel dado por el coeficiente de determinación ajustado (74.02%) y que permite la predicción y optimización de la variable respuesta. El modelo de regresión lineal obtenido en el experimento es el siguiente:

$$\text{Rendimiento} = 7.44792 - 0.195417 * \text{Mínima} + 0.0745833 * \text{Crucero} + 0.11325 * \text{Último cambio}$$

Donde las unidades que toman los factores son los especificados en la Tabla 2.

Usando el módulo de optimización del *software* utilizado para el análisis de los resultados, se encontró que la variable respuesta (rendimiento de combustible) permite lograr un valor máximo de 10.13 KPG cuando los factores se trabajan en los siguientes niveles:

- *Mínima*: 7%
- *Crucero*: 24%
- *Último cambio*: 20%

La superficie de respuesta estimada con estas condiciones de operación es la mostrada en la Figura 9. Se nota que los mejores resultados en rendimiento del combustible se logran cuando el porcentaje de *mínima* disminuye y con altos porcentajes de *crucero*.

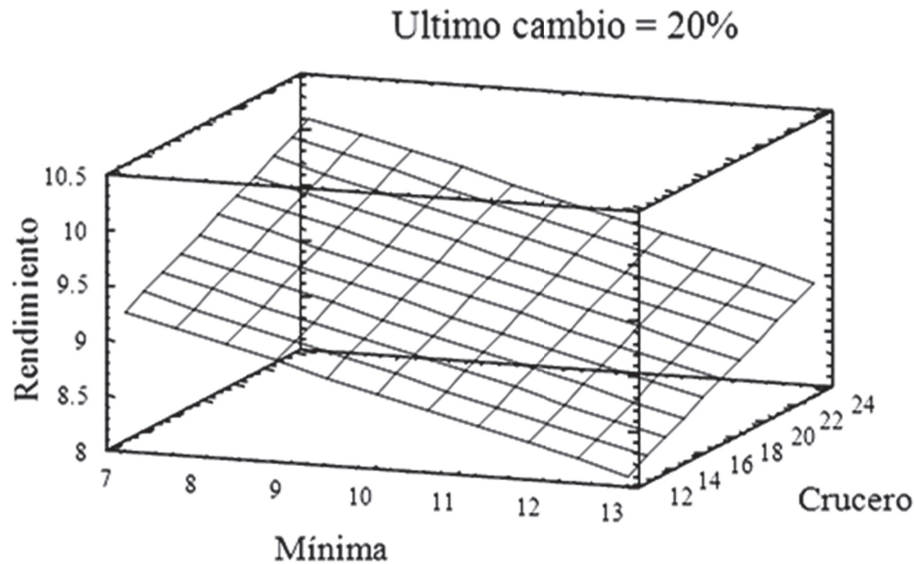


Figura 9. Superficie de respuesta para Rendimiento con Ultimo Cambio=20%

## DISCUSIÓN

La operación del vehículo utilizado en el experimento, en los niveles óptimos encontrados de los factores, permitiría obtener un aumento de 22.5% en el rendimiento de combustible, al pasar de 8.27 KPG en las condiciones actuales, hasta un máximo de 10.13 KPG.

Considerando el recorrido donde se llevó a cabo el experimento (1,310 Km.), el ahorro total en el mismo sería de 29.1 galones de combustible en cada viaje. Este incremento en el rendimiento del combustible se refleja en una reducción de 18.36% en los costos del mismo.

## CONCLUSIONES

El diseño de experimentos es una herramienta adecuada para el estudio de los factores operacionales que intervienen en un proceso. Permite identificar los factores y/o interacciones realmente significativos y determinar su importancia para, luego, obtener un modelo final con los niveles que optimizan la variable respuesta.

Con la implementación de un plan operacional que tenga como eje central el establecimiento de los factores *mínima* en nivel bajo (7%), *crucero* en nivel alto (24%) y *último cambio* en nivel alto (20%), como parámetros de operación rutinaria del vehículo, es posible lograr una tasa de incremento de hasta 22.5% en el rendimiento de combustible.



Aunque los resultados obtenidos en cuanto a niveles óptimos de los factores en estudio son sólo aplicables a vehículos que operen bajo las mismas condiciones en que se realizó el experimento en relación a la ruta, tipo de motor, peso transportado y condiciones técnico-mecánicas, éste sirve como un referente conceptual válido para demostrar que la forma de conducir influye sobre el rendimiento de combustible en vehículos de transporte de carga pesada.

El modelo lineal encontrado explica el 74.02% de la variabilidad experimentada en el consumo de combustible. Existen otras variables externas incontrolables propias de la operación de transporte de cargas como el ambiente atmosférico, geografía del terreno, congestión vehicular, entre otras, que influyen en el rendimiento del combustible y que pueden obligar al operador a conducir bajo unas condiciones tales que atenten contra la optimización del consumo de combustible.

## REFERENCIAS

1. TSENG, Yung-yu; TAYLOR, Michael. y YUE Wen Long. The role of transportation in logistics chain. En: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2005. Vol. 5, p. 1657 – 1672.
2. COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Estructura de costos de operación vehicular para transporte de carga año 2006. Bogotá: El Ministerio - Dirección de Tránsito y Transporte, 2007, 7 p.
3. SENTERNOVEM. Ecodriving: Smart, efficient driving techniques. Netherlands: EU Treatise Project, 2005. 34 p.
4. SCHWEITZER, Lisa; BRODRICK, Christie-Joy y SPIVEY, Sue. Truck driver environmental and energy attitudes: an exploratory analysis. En: Transportation Research. Part D. January 2008. Vol. 13, no. 3, p. 141 – 150.
5. ENERGY AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS, INC. Owner related fuel economy improvements. Arlington, Virginia: Oak Ridge National Laboratory, 2001. 30 p.
6. KOMOR, Paul. Reducing energy use in US freight transport. En: Transport Policy. April 1995. Vol. 2, no. 2, p. 119 – 128.
7. DE VLIIEGER, I.; DE KEUKELEERE, D. and KRETZSCHMAR, J.G. Environmental effects of driving behavior and congestion related to passenger cars. En: Atmospheric Environment. 2000. Vol. 34, no. 27; p. 4649 – 4655.
8. WANG, Haikun, et al. Modelling of the fuel consumption for passenger cars regarding driving characteristics. En: Transportation Research. Part D. January 2008. Vol. 13, no. 7, p. 479 – 482.
9. MARTÍNEZ MARTÍNEZ, Reinaldo; et al. Vías para incrementar la eficiencia energética en el transporte automotor. En: IV CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA (Noviembre: 2006: Santa Clara, Cuba). Cuba: UCVL, 2006. p. 1-8.

10. VANTELON, A. Training operators in technical driving and its influence on fuel consumption. En: XII NATIONAL SYMPOSIUM ON THE RATIONAL USE OF ENERGY (1991: México D.F.).
11. RAFAEL-MORALES, Mercedes and CERVANTES DE GORTAR, Jaime. Reduced consumption and environment pollution in Mexico by optimal technical driving of heavy motor vehicles. En: Energy. December 2002.Vol. 27, no.12, p. 1131 – 1137.
12. RAFAEL, M; et al. Impact of driving styles on exhaust emissions and fuel economy from a heavy-duty truck: laboratory tests. En: International Journal of Heavy Vehicle Systems. January 2006.Vol. 13, no. 12, p. 56 –73.
13. LIM, M.C.H; et al. The effects of fuel characteristics and engine operating conditions on the elemental composition of emissions from heavy duty diesel buses. En: Fuel. January 2007.Vol. 86, no.12, p. 1831 – 1839.
14. MONTGOMERY, Douglas C. Design and analysis of experiments. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, 2005. 684 p.
15. CUMMINS ENGINE COMPANY. Ficha técnica motor Cummins ISX 475. México D.F.: CUMMINS INC, 2004.
16. EL-SHAWARBY, Ihab;AHN, KyoungHo and RAKHA, Hesham.. Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions. En: Transportation Research. Part D. January 2005. no. 1, p. 13–30.
17. AFWAHLBERG, A.E. Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback. En: International Journal of Industrial Ergonomics. January 2007. No. 37, p. 333–343.
18. LARSSON, Hanna and ERICSSON, Eva. The effects of an acceleration advisory tool in vehicles for reduced fuel consumption and emissions. En: Transportation Research. Part D. January 2009.Vol. 14, no. p. 141 – 146.
19. HELLSTRÖM, Erik; et al. Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. En: Control Engineering Practice. February 2009.Vol. 17, no. 2, p. 245–254.
20. GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto. Análisis y diseño de experimentos. 2ª ed. México D.F.: McGrawHill, 2008. 405 p.