Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.05
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Evaluación de las emisiones contaminantes en vehículos diésel alimentados con biodiésel en condiciones reales de conducción

Evaluation of pollutant emissions from Diesel Vehicles Fueled with biodiesel under Real-World driving conditions

Edilberto Antonio Llanes-Cedeño[1,*], Andrés Cárdenas-Yánez[1], Edwin Chamba[1], Juan Carlos Castelo[2], Juan Carlos Rocha-Hoyos[2]

Recibido: 22-02-2025, Recibido tras revisión: 02-06-2025, Aceptado: 05-06-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen

Esta investigación evalúa los efectos de las mezclas de biodiésel de aceite de fritura usado (B10 y B20) con combustible convencional, en términos de emisiones, a gran altitud (entre 2619 y 2877 msnm), bajo condiciones reales de conducción en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. Se realizaron ensayos comparativos con dos vehículos con motor diésel; el primer sistema CRDI de inyección directa de common rail denominado M2.5C; el segundo, con sistema de bomba de inyección, denominado H2.5B, ambos alimentados inicialmente con diésel puro como línea base. Las tasas de emisiones de escape se cuantificaron en caliente mediante el sistema portátil de medición de emisiones (PEMS), a lo largo de una ruta de 15,7 km que incluyó condiciones de ascenso, descenso por carretera y tramos urbanos. Los resultados permiten concluir que las emisiones mínimas de CO se registran al utilizar diésel convencional en ambos motores (H2.5B y M2.5C); las emisiones de HC son mínimas con la mezcla B20, y las emisiones de NO_x no presentan variaciones significativas, independientemente del combustible utilizado. En el circuito urbano, tampoco se observa una variación significativa de las emisiones de NO_x según el tipo de combustible.

Palabras clave: consumo de combustible, aire acondicionado, biodiésel, conducción eficiente, combustible, altitud, ciclo de conducción

Abstract

This study evaluates the impact of B10 and B20 biodiesel blends produced from waste frying oil on pollutant emissions when used in diesel-powered vehicles operating under real-world driving conditions at high altitudes, ranging from 2619 to 2877 meters above sea level, in the Metropolitan District of Quito, Ecuador. Comparative tests were conducted using two diesel vehicles: one equipped with a common rail direct injection (CRDI) system, designated as M2.5C, and another with an injection pump system, referred to as H2.5B. Both vehicles were initially fueled with conventional diesel to establish a baseline. Exhaust emissions were measured under hot-engine conditions using a Portable Emissions Measurement System (PEMS) along a 15.7 km route that included ascending, descending, and urban driving segments. The findings indicate that carbon monoxide (CO) emissions were lowest when pure diesel was used in both engine types. Hydrocarbon (HC) emissions were minimal when B20 biodiesel was employed, regardless of the vehicle. Nitrogen oxide (NO_x) emissions showed no significant differences across the fuels tested, and in urban driving conditions, NO_x levels remained consistently stable.

Keywords: fuel consumption index, air conditioning, efficient driving, fuel, schedule, driving cycle.

[1,*]Ingeniería Automotriz/Eficiencia, Impacto Ambiental e Innovación Grupo de Investigación en Industria y Transporte, Universidad Internacional SEK, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: antonio.llanes@uisek.edu.ec.
[2]Facultad de Mecánica / Grupo de Investigación en Producción Científica con Tecnología Moderna en el Campo Automotriz INVELECTRO, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

Forma sugerida de citación: E. A. Llanes-Cedeño, A. Cárdenas-Yánez, E. Chamba, J. C. Castelo y J. C. Rocha-Hoyos, "Evaluación de las emisiones contaminantes en vehículos diésel alimentados con biodiésel en condiciones reales de conducción," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 34, pp. 61-74, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.05.

1. Introducción

La combustión de combustibles fósiles derivados del petróleo produce emisiones tóxicas y perjudiciales para la salud pública. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), nueve de cada diez personas en todo el mundo están expuestas a aire contaminado, lo que contribuye a la muerte prematura de aproximadamente siete millones de personas cada año [1]. En América Latina y el Caribe, más de 100 millones de personas están expuestas a niveles de contaminación del aire que superan los umbrales recomendados por la OMS [2, 3]. Es importante señalar que las emisiones de los motores diésel han sido clasificadas como cancerígenas para los seres humanos [4, 5].

El sector del transporte ha superado al sector energético como el principal contribuyente a las emisiones de carbono y otros contaminantes, que agravan el efecto invernadero y el calentamiento global [6]. Según el Foro Internacional de Transporte, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) del transporte representan el 23 % del total mundial y constituyen el 30 % de todas las emisiones de CO_2 derivadas de la combustión de combustibles fósiles [7]. Además, el sector del transporte es la principal fuente de contaminantes atmosféricos convencionales, responsables de las altas concentraciones de ozono y material particulado (PM) en entornos urbanos [8].

Aunque existe abundante literatura sobre las emisiones vehiculares, la mayoría de los estudios se han realizado en ciudades ubicadas a nivel del mar o cerca de este [9]. En Ecuador, la contaminación del aire provocada por la combustión de hidrocarburos ha alcanzado niveles alarmantes en los últimos años. Uno de los principales factores que más contribuye a esta situación es la topografía del país, con ciudades como el Distrito Metropolitano de Quito, situado a una altitud promedio de 2850 metros sobre el nivel del mar [10]. A grandes altitudes, la combustión se vuelve menos eficiente, lo que genera un aumento en las emisiones de óxidos de nitrógeno NO_x y material particulado (PM) [11].

Además, el diésel utilizado en Ecuador contiene aproximadamente 350 ppm de azufre, lo que limita la importación de vehículos equipados con tecnologías de postratamiento diseñadas para reducir las emisiones de NO_x y PM [12]. Las altitudes elevadas también se asocian con un aumento en las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC), PM y hollín [13]. Asimismo, existe evidencia de que las emisiones reales de NO_x en vehículos diésel han mostrado poca mejora en el tiempo y con frecuencia superan los límites regulatorios por márgenes significativos [14, 15].

La altitud afecta las presiones de admisión y escape, lo que puede provocar la obstrucción de los filtros de aire y de los filtros de partículas diésel (DPF). También se han documentado variaciones en las características de pulverización y combustión en motores diésel a lo largo de altitudes entre 0 y 4500 metros, siendo la presión de inyección un factor determinante [16].

Según Fontaras et al. [17], el Procedimiento Mundial Armonizado de Pruebas para Vehículos Ligeros (WLTP,) proporciona estimaciones de emisiones de CO_2 más representativas de las condiciones reales de conducción que las del Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC). Sin embargo, la prueba de emisiones en condiciones reales de conducción (RDE), diseñada para asegurar el cumplimiento normativo en carretera, apunta específicamente a la reducción de las emisiones de NO_x en vehículos diésel, mediante el uso de sistemas portátiles de medición de emisiones (PEMS) [18].

Tradicionalmente, las emisiones vehiculares se evalúan mediante ciclos de prueba estandarizados aplicados en dinamómetros, como el Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC), el Ciclo de Prueba Mundialmente Armonizado para Vehículos Ligeros (WLTC) y el Procedimiento de Prueba Federal de la EPA (FTP-75). Sin embargo, diversos estudios han demostrado que estos protocolos de laboratorio no siempre reflejan con precisión el comportamiento real de las emisiones durante la operación cotidiana de los vehículos. Como resultado, las metodologías de prueba en carretera han ganado relevancia, al utilizar PEMS para evaluar el desempeño de los vehículos en escenarios de conducción reales, incluyendo pendientes, variabilidad del tráfico, fluctuaciones de temperatura ambiente y cambios en la velocidad de conducción. Según Kousoulidou et al. [19], las emisiones reales de óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) pueden ser de dos a cuatro veces mayores que las medidas en entornos de laboratorio controlados.

Los motores diésel son reconocidos por su bajo costo de instalación, alta eficiencia energética, estabilidad operativa y notable adaptabilidad a diversas condiciones [20, 21]. Sin embargo, las reservas de combustibles fósiles están disminuyendo rápidamente debido al ritmo actual de consumo [22]. Esto ha impulsado un creciente interés en el desarrollo de combustibles alternativos renovables, sostenibles y ambientalmente responsables. Entre estos, los biocombustibles se perfilan como una fuente energética prometedora, capaz de fortalecer la seguridad energética, económica y ambiental [23].

El biodiésel, en particular, ha captado la atención mundial, tanto como componente de mezclas como sustituto directo de los combustibles convencionales en los motores de combustión interna (ICE) [24, 25]. Para mitigar las emisiones de contaminantes nocivos, se han propuesto mezclas de diésel con biodiésel derivado de oleaginosas y otras materias primas como alternativas viables [26]. No obstante, existe escasa evidencia empírica sobre el impacto de estas mezclas en el rendimiento y las emisiones de motores diésel no

diseñados originalmente para con biodiésel [27].

Además, los estudios que analizan los efectos sobre la salud de la combustión de biodiésel deben interpretarse considerando los avances tecnológicos en motores diésel, desarrollados en respuesta a regulaciones de emisiones más estrictas [28, 29].

El biodiésel ha emergido como una alternativa viable a los combustibles fósiles, despertando un interés creciente por su capacidad para reducir emisiones contaminantes y mitigar el impacto ambiental de los motores de encendido por compresión. Derivado de materias primas renovables como aceites vegetales, grasas animales y aceites de cocina reciclados, este biocombustible ofrece ventajas significativas en términos de sostenibilidad y reducción de gases de efecto invernadero (GEI) [30, 31].

Según Demirbas [32], las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) procedentes de la combustión de biodiésel pueden reducirse hasta en un 78 % en comparación con el diésel convencional. Asimismo, el biodiésel genera menores emisiones de material particulado, óxidos de azufre (SO_x) y monóxido de carbono (CO), lo cual contribuye a una mejor calidad del aire urbano [33]. No obstante, su impacto sobre las emisiones de NO_x sigue siendo variable, dependiendo de factores como las condiciones de combustión y el diseño del motor.

Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de las mezclas de biodiésel B10 y B20, derivadas de aceite de freído usado y combinadasas con diésel convencional, sobre las emisiones vehiculares en condiciones de gran altitud, dentro de un rango de 2619 a 2877 metros sobre el nivel del mar. La evaluación se llevó a cabo mediante pruebas en carretera, con el fin de cuantificar las emisiones durante la conducción real en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador.

2. Materiales y métodos

El trabajo experimental se desarrolló en dos etapas. La primera etapa correspondió a la caracterización del combustible diésel base y sus mezclas con biodiésel. La segunda incluyó la evaluación de las emisiones del escape de un motor diésel alimentado con diésel puro y mezclas de biodiésel-diésel (B10 y B20). Todas las pruebas se realizaron a una altitud de 2810 metros sobre el nivel del mar, en el Laboratorio de Análisis de Vehículos y Movilidad Sostenible (LIAVMS), ubicado en Quito, Ecuador.

2.1. Caracterización del aceite de cocina usado y producción de biodiésel.

Se recolectaron 100 litros de aceite de cocina usado de un restaurante ubicado en las cercanías de la Universidad SEK en Quito, Ecuador. El aceite fue centrifugado y filtrado para eliminar sólidos suspendidos, y posteriormente calentado para reducir su contenido de agua. El aceite recolectado había sido sometido a al menos diez ciclos de fritura previos a su recuperación. La Tabla 1 presenta las características fisicoquímicas y propiedades relevantes como combustible del aceite de cocina usado [34].

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del aceite de cocina usado

Propiedad	Valor
Acidez	1,998±0,02
Viscosidad cinemática (mm^2/s, a 313 K)	35,4±0,05
pH	2,9±0,0
Densidad (kg/L, a 288 K)	0,931±0,02
Contenido de agua (%)	0,46±0,01
Índice de saponificación	124,31±0,03
Índice de yodo	30,85±0,01
Número de cetano	47±0,1
Ácidos grasos libres (mg KOH/g aceite)	1,29±0,03

El aceite de cocina usado fue transformado en ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) mediante un proceso de transesterificación catalizada por base, utilizando hidróxido de potasio (KOH) disuelto en metanol. La reacción se llevó a cabo en un baño térmico a 90 °C durante 3 horas, con una velocidad de agitación de 900 rpm. Al finalizar, la mezcla de reacción fue filtrada utilizando equipo Millipore. Para purificar el filtrado, se añadieron 5 mL de agua Milli-Q para el lavado, seguidos de 2 mL de una mezcla de hexano: dietil éter (80:20) para eliminar impurezas residuales, trazas de catalizador y solvente. La mezcla fue transferida a embudos de separación y se dejó reposar durante 20 minutos para facilitar la separación de fases. La fase orgánica fue recolectada en tubos previamente pesados y secada en un horno a 60 °C durante 24 horas.

El costo de producción de un litro de biodiésel en condiciones de laboratorio fue de aproximadamente tres dólares estadounidenses, un valor que podría reducirse en procesos industriales. En comparación, el precio internacional del diésel convencional ronda el dólar por litro, lo cual hace que la producción de biodiésel sea económicamente inviable a escala de laboratorio. No obstante, es importante destacar que el biodiésel no suele utilizarse en una concentración del 100 % (B100). La literatura recomienda mezclas no superiores al 20 % (B20), debido a la reducción del torque y potencia del motor asociada [35]. Por lo tanto, un litro de biodiésel puede mezclarse con al menos cinco litros de diésel convencional, lo que mejora su viabilidad económica cuando se aplica bajo condiciones reales de mezcla.

2.2. Caracterización de las mezclas diésel/biodiésel

Se presentan las propiedades fisicoquímicas de las muestras de combustible, caracterizadas de acuerdo con las normas ASTM y comparadas con los límites establecidos por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1489:2012 para mezclas de diésel y biodiésel. Todos los valores medidos cumplieron con los requisitos especificados. Según la literatura, un número de cetano más alto contribuye a mejorar el desempeño de la combustión en motores diésel [26], [33].

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de las mezclas de diésel y biodiésel

Propiedades	Standard	Diésel Premium	Diésel / 10% biodiésel (B10)	Diésel / 20 % biodiésel (B20)	INEN Standard: 1489 2012
Número de cetanos	ASTM D976	51.7	53.2	53.5	45 min.
Curva de destilación T90 – 90 % evap, (°C)	ASTM D88	336	336	343	360 max.
Flash Point (°C)	ASTM D93	61	63	66	51 min.
Contenido de sulfuros (ppm)	ASTM D4294	145.9	122.7	106.7	650 max.
Corrosión de la tira de cobre	ASTM D130	1A	1A	1A	3
Viscosidad cinemática a 40 °C (mm^2/s)	ASTM D445	3.528	3.445	3.459	2-May
Agua y contenido de sedimentos (%)	ASTM D1796	<0,05	<0,05	<0,05	0.05 max.

2.3. Vehículos de prueba

La Tabla 3 presenta las especificaciones técnicas de los dos vehículos de prueba utilizados en este estudio. El primer vehículo, una furgoneta MB-5 año modelo 2015, registraba un kilometraje de 55 000 km. El segundo vehículo, una furgoneta H2.5 también del 2015, había acumulado 143 365 km. Aunque la H2.5 está equipada con un sistema de inyección más antiguo, fue incluida en el estudio debido a su continua presencia en el mercado de vehículos usados en Ecuador. Además, este tipo de motor sigue siendo utilizado en aplicaciones de alta demanda, como camiones, locomotoras y embarcaciones marítimas, donde la durabilidad y la simplicidad mecánica son características clave.

Antes de las pruebas experimentales, ambos vehículos fueron sometidos a mantenimiento preventivo, que incluyó cambio de aceite, reemplazo de filtros de combustible y limpieza de inyectores. El modelo de vehículo seleccionado es de uso común en regiones montañosas de Ecuador, dada la variabilidad geográfica del país y la prevalencia de vías de tercer orden. Además, la marca del vehículo se encuentra entre las diez más vendidas en el parque automotor nacional, lo cual añade relevancia a su inclusión en el estudio [36]. Su cilindrada representa una configuración promedio para esta clase de vehículos y está equipado con un convertidor catalítico, diseñado para reducir las emisiones contaminantes.

Tabla 3. Especificaciones técnicas principales de los vehículos de prueba

Modelo	Sistema de combustible	Tipo de motor	Desplazamiento (cm^3)	Fuerza	Torque	Relación de compresión
M2.5C camioneta con cabina doble	CRDI Común Rail Diésel Electrónico Inyección EURO 3	4 cilindros en línea, DOHC	2499 cm^3	117.3 kW 3500 rpm	330 Nm 1800 rpm	18:01
H2.5B Van	Inyección bomba, tipo de derivación EURO 3	4 cilindros en línea, SOHC, TCi (Control de sincronización de inyección)	2476 cm^3	73.08 kW 3800 rpm	392 Nm 2000 - 2500 rpm	21:01

2.4. Circuito vial

El ciclo de conducción utilizado en este estudio se basó en la ruta desarrollada por Pisuña y Solís [36], con una longitud total de 15 673 metros, que comprende 7993 metros de carretera suburbana y 7680 metros de segmentos urbanos. La Figura 1 muestra la ruta seleccionada para las pruebas de emisiones a bordo, diseñada para evaluar el desempeño del vehículo en relación con la altitud y las emisiones contaminantes. La elevación promedio a lo largo de la ruta es de 2610 metros sobre el nivel del mar [37].

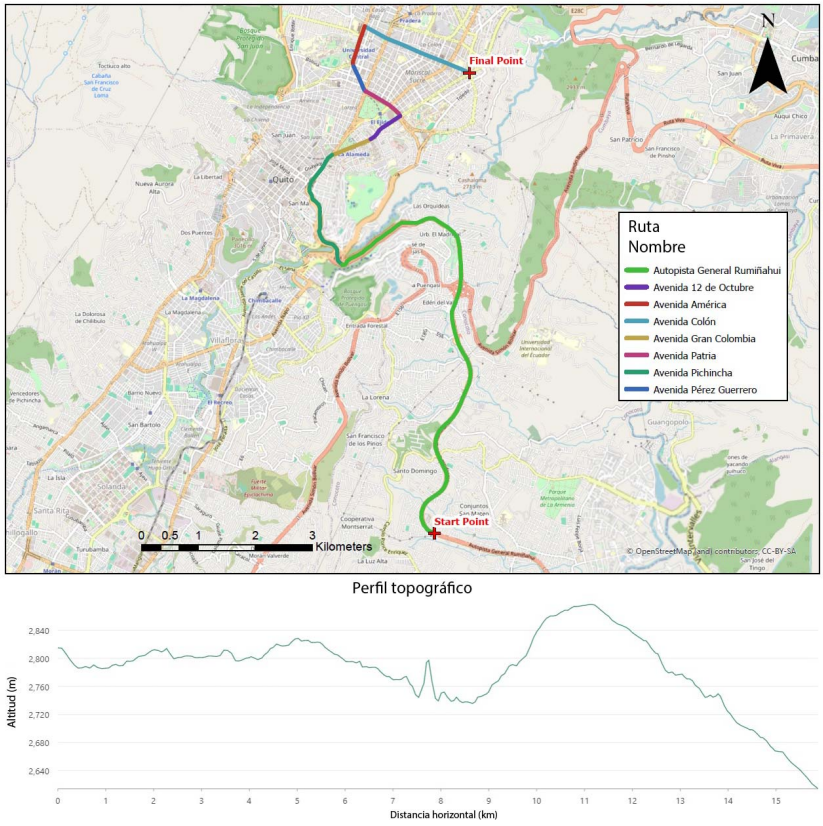

Figura 1. Ruta de conducción utilizada para las pruebas de emisiones a bordo [36]

La ruta se divide en dos secciones principales. La primera comienza con un ascenso por la Avenida Rumiñahui, durante el cual se recopilaron datos para análisis posteriores, seguido de un descenso hacia el intercambiador del Trébol, que proporcionó un segundo conjunto de mediciones. La segunda sección abarca la porción urbana de la ruta, extendiéndose desde el intercambiador del Trébol hasta la Plaza Artigas. Esta fase del estudio consideró variables como la densidad del tráfico, el número de vehículos circulantes, la temperatura ambiental y las condiciones climáticas. Los datos recolectados permitieron realizar un análisis comparativo entre las diferentes alternativas de combustible y sus impactos ambientales bajo condiciones reales de conducción.

El estudio fue diseñado para analizar la ruta en secciones discretas en lugar de tratarla como un tramo continuo, fundamentado en múltiples consideraciones técnicas. Estas incluyeron la variabilidad en la carga del motor, la necesidad de una caracterización precisa del comportamiento de conducción en condiciones reales, una mejor calibración de los modelos de simulación, y el desarrollo de estrategias de mitigación específicas para los segmentos asociados con mayores niveles de emisiones, como pendientes pronunciadas o áreas urbanas congestionadas.

2.5. Sistema portátil de adquisición de datos de emisiones

Las mediciones de gases de escape se realizaron utilizando el equipo Axion OEM-2100AX, el cual registra las concentraciones volumétricas de contaminantes mediante su interfaz con el puerto de diagnóstico a bordo del vehículo (OBD2) [28]. Las especificaciones técnicas del equipo se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del sistema de medición de emisiones Axion OEM-2100AX

Parámetro	Rango de medición	Precisión	Resolución
Medición de O_2 (sensor)	Mayor o igual que (0,01 a 25 % vol.)	Mayor o igual que 0,1 % abs.	Mayor o igual al 0,01 % vol.
Medición de CO (NDIR)	Mayor o igual que (0,001 a 10 % vol.)	Mayor o igual que 0,02 % abs.	Mayor o igual al 0,001 % vol.
Medición de óxido de nitrógeno (sensor)	Mayor o igual que (0 a 4000 ppm)	Mayor o igual a 25 ppm abs.	Mayor o igual a 1 ppm
Medición de CO_2 (NDIR)	Mayor o igual que (0,01-16 % vol.)	Mayor o igual que 0,30 % abs.	Mayor o igual al 0,01 % vol.
Medición de HC (NDIR)	Mayor o igual que (1 a 15 000 ppm)	Mayor o igual a 4 ppm abs.	Mayor o igual a 1 ppm

2.6. Análisis de variables

Se implementó un diseño factorial multinivel para evaluar diversas mezclas de combustible (diésel, B10 y B20) en dos vehículos con tecnologías de inyección distintas: inyección directa common rail (CRDI) y sistema de bomba de inyección mecánica. Cada vehículo fue probado bajo tres condiciones de conducción: ascenso, urbano y descenso, generando múltiples combinaciones experimentales para la evaluación de emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), así como las concentraciones de oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2). Se realizaron cinco repeticiones para cada condición experimental. Se aplicaron cartas de control para evaluar la fiabilidad de los datos, asegurando la consistencia mediante la identificación de desviaciones respecto a los umbrales de aceptables [38]. La nomenclatura utilizada para las combinaciones factoriales se resume en las Tablas 5 y 6. La metodología estadística sigue el enfoque propuesto por varios autores, incluyendo [24].

Según Serrano et al. [39], la influencia de las variables independientes sobre las variables respuesta puede analizarse eficazmente mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés) [40, 41]. El análisis estadístico fue realizado utilizando la versión educativa de Statgraphics Centurion XVI.

Tabla 5. Niveles de factores y códigos de designación

Factores	Niveles	Designación 1	Designación 2
Vehículo	M2.5C (2,5 cm^3 CDRI)	1	A2
	H2.5B (2,5 cm^3 bomba de inyección)	-1	A1
Tipo de combustible	Diésel	1	C1
	B10	0	C2
	B20	-1	C3
Condiciones de manejo	Ascenso	1	AS
	Urbano	0	UR
	Descenso	-1	DE

Tabla 6. Combinaciones de tratamientos experimentales para el análisis de superficie de respuesta

Tratamiento	Vehículo	Combustible	Condiciones de manejo
1	A1	C1	AS
2	A1	C2	UR
3	A2	C2	UR
4	A2	C1	AS
5	A1	C3	UR
6	A2	C2	DE
7	A1	C3	DE
8	A2	C3	DE
9	A1	C1	DE
10	A2	C3	UR
11	A2	C1	UR
12	A1	C2	DE
13	A2	C1	DE
14	A1	C3	AS
15	A2	C3	AS
16	A1	C2	AS
17	A1	C1	UR
18	A2	C2	AS

3. Resultados y discusión

Esta sección presenta los resultados obtenidos a partir de los procedimientos experimentales. Las Tablas 7 y 8 resumen los datos utilizados en el análisis de superficie de respuesta (RSM) para los dos vehículos de prueba. En todos los casos, las desviaciones estándar fueron bajas y los coeficientes de variación se mantuvieron por debajo del 20 %, lo cual indica niveles de variabilidad moderados y aceptables. Los valores de rango, definidos como la diferencia entre las mediciones máximas y mínimas, también se ubicaron dentro de límites aceptables para la mayoría de las variables evaluadas.

La metodología de superficie de respuesta (RSM) ha sido ampliamente utilizada en estudios similares para evaluar la influencia de múltiples factores independientes sobre variables dependientes, así como para construir modelos predictivos de sus interacciones. Este enfoque ha sido aplicado por Morales-Bayetero et al. [35], Guardia et al. [41] y Rocha-Hoyos et al. [26], entre otros.

Tabla 7. Resumen estadístico de las mediciones de emisiones para el vehículo H2.5B

	Cantidad	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Rango
$ADCO_2$	5	7.76	0.44	5.74	1.06
$AB10CO_2$	5	9.03	0.28	3.13	0.62
$AB20CO_2$	5	8.67	0.34	4.01	0.78
ADCO	5	0.02	0	0	0
AB10CO	5	0.02	0	0	0
AB20CO	5	0.018	0.002	11.29	0.004
ADHC	5	112.41	4.84	4.3	11.79
AB10HC	5	164.74	4.75	2.88	10.23
AB20HC	5	131.47	10.59	8.06	24.03
$ADNO_x$	5	334.47	10.54	3.15	23.67
$AB10NO_x$	5	352.89	7.8	2.21	17.66
$AB20NO_x$	5	360.86	9.89	2.74	22.16
$DDCO_2$	5	3.56	0.29	8.34	0.64
$DB10CO_2$	5	4.22	0.57	13.52	1.26
$DB20CO_2$	5	4.2	0.15	3.75	0.38
DDCO	5	0.017	0.002	16.49	0.005
DB10CO	5	0.015	0.002	18.85	0.006
DB20CO	5	0.011	0.0004	3.97	0.001
ADHC	5	129.63	3.8	2.93	9.06
DB10HC	5	169.55	2.62	1.54	5.82
DB20HC	5	141.45	5.98	4.23	13.68
$DDNO_x$	5	157.18	4.03	2.56	9.65
$DB10NO_x$	5	152.27	5.31	3.48	13.01
$DB20NO_x$	5	182.86	12.96	7.08	30.92
UDCO2	5	3.42	0.32	9.48	0.73
$UB10CO_2$	5	3.92	0.1	2.58	0.22
$UB20CO_2$	5	3.69	0.24	6.56	0.58
UDCO	5	0.011	0.0008	7.42	0.002
UB10CO	5	0.011	0.0012	11.22	0.003
UB20CO	5	0.011	0.0012	11.22	0.003
UDHC	5	75.06	2.47	3.29	5.33
UB10HC	5	126.15	7.11	5.63	16.31
UB20HC	5	112.26	3.33	2.97	8.17
$UDNO_x$	5	167.52	6.13	3.66	14.39
$UB10NO_x$	5	173.45	2.43	1.4	5.36
$UB20NO_x$	5	179.53	8.01	4.46	18.69

Nota: $ADCO_2$ (ascenso diésel CO_2 (%)), $AB10CO_2$ (ascenso B10 CO_2 (%)), $AB20CO_2$ (ascenso B20 CO_2 (%)), ADCO (ascenso diésel CO (%)), AB10CO (ascenso B10 CO (%)), AB20CO (ascenso B20 CO (%)), ADHC (ascenso diésel HC (ppm)), AB10HC (Ascenso B10 HC (ppm)), AB20HC (Ascenso B20 HC (ppm)), $ADNO_x$ (Ascenso diésel NO_x (ppm)), $AB10NO_x$ (Ascenso B10 NO_x (ppm)), $AB20NO_x$ (Ascenso B20 NO_x (ppm)), $DDCO_2$ (Descenso Diésel CO_2 (%)), $DB10CO_2$ (Descenso B10 CO_2 (%)), $DB20CO_2$ (Descenso B20 CO2 (%)), DDCO (Descenso Diésel CO (%)), DB10CO (Descenso B10 CO (%)), DB20CO (Descenso B20 CO (%)), DDHC (Descenso Diésel HC (ppm)), DB10HC (Descenso B10 HC (ppm)), DB20HC (Descenso B20 HC (ppm)), $DDNO_x$ (Descenso Diésel NO_x (ppm)), $DB10NO_x$ (Descenso B10 NO_x (ppm)), $DB20NO_x$ (Descenso B20 NO_x (ppm)), $UDCO_2$ (Urbano Diésel CO_2 (%)), $UB10CO_2$ (Urbano B10 CO_2(%)), $UB20CO_2$ (Urbano B20 CO_2(%)), UDCO (Urbano Diésel CO (%)), UB10CO (Urbano B10 CO (%)), UB20CO (Urbano B20 CO (%)), UDHC (Urbano Diésel HC (ppm)), UB10HC (Urbano B10 HC (ppm)), UB20HC (Urbano B20 HC (ppm)), $UDNO_x$ (Urbano Diésel NO_x (ppm)), $UB10NO_x$ (Urbano B10 NO_x (ppm)), $UB20NO_x$ (Urbano B20 NO_x (ppm)).

Tabla 8. Resumen estadístico de las mediciones de emisiones para el vehículo M2.5C

	Cantidad	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Rango
$ADCO_2$	5	8.71	0.62	7.13	1.42
$AB10CO_2$	5	8.17	0.24	3.04	0.61
$AB20CO_2$	5	8.85	0.46	5.3	0.99
ADCO	5	0.45	0.03	7.94	0.08
AB10CO	5	0.29	0.02	9.78	0.07
AB20CO	5	0.43	0.03	8.9	0.09
ADHC	5	143.02	1.33	0.92	3.03
AB10HC	5	107.46	1.89	1.76	4.01
AB20HC	5	86.82	2.82	3.25	6.48
$ADNO_x$	5	469	15.71	3.34	32.97
$AB10NO_x$	5	542.2	10.43	1.92	22.98
$AB20NO_x$	5	494.52	3.22	0.65	6.7
$DDCO_2$	5	4.32	0.311	7.219	0.55
$DB10CO_2$	5	4.76	0.11	2.46	0.27
$DB20CO_2$	5	5.13	0.19	3.84	0.46
DDCO	5	0.15	0.02	14.54	0.05
DB10CO	5	0.23	0.03	12.79	0.07
DB20CO	5	0.22	0.02	9.74	0.05
ADHC	5	219.93	5.7	2.59	13.38
DB10HC	5	234.55	4.43	1.88	9.7
DB20HC	5	136.5	3.6	2.63	6.68
$DDNO_x$	5	299.88	8.18	2.72	15.29
$DB10NO_x$	5	322.53	9.31	2.88	21.62
$DB20NO_x$	5	256.29	9.19	3.58	20.72
$UDCO_2$	5	4	0.06	1.51	0.14
$UB10CO_2$	5	3.86	0.15	3.93	0.37
$UB20CO_2$	5	4.39	0.16	3.74	0.39
UDCO	5	0.19	0.01	8.64	0.04
UB10CO	5	0.17	0.02	11.61	0.04
UB20CO	5	0.2	0.009	4.61	0.02
UDHC	5	145.08	7.86	5.41	17.98
UB10HC	5	174.43	1.71	0.98	3.71
UB20HC	5	122.78	2.39	1.94	5.7
$UDNO_x$	5	275.74	8.52	3.09	19.18
$UB10NO_x$	5	339.06	17.19	5.07	36.23
$UB20NO_x$	5	322.82	11.51	3.56	24.1

3.1. Análisis experimental de las emisiones de CO_2 y CO

La Figura 2 muestra los patrones de emisión de dióxido de carbono (CO_2) del vehículo H2.5B (motor con bomba de inyección de 2.5 L) bajo diferentes tipos de combustible y condiciones de conducción. Las emisiones más bajas de CO_2 se registraron durante el descenso utilizando combustible diésel convencional, alcanzando valores de aproximadamente 2,8 % en volumen, lo que indica una mayor eficiencia de combustión bajo carga reducida del motor y condiciones de operación favorables.

En cuanto a las emisiones de monóxido de carbono (CO), los resultados más favorables también se observaron al usar diésel durante el descenso, así como durante el ascenso utilizando biodiésel B20, donde las concentraciones de CO descendieron a aproximadamente 0,0008 % en volumen.

En el caso del vehículo M2.5C (motor CRDI de 2.5 L), el comportamiento de las emisiones de CO_2 fue consistente con el observado en el vehículo H2.5B, como se muestra en la Figura 3a. Las concentraciones más bajas de CO_2 se registraron durante el descenso, utilizando diésel convencional. Sin embargo, en lo referente a las emisiones de CO, el tipo de combustible no pareció ser un factor influyente significativo. En cambio, las condiciones de conducción jugaron un papel más determinante. Los valores más bajos de CO se observaron nuevamente durante el descenso, alcanzando aproximadamente 0.0008%, idénticos a los valores mínimos registrados para el vehículo H2.5B (Figura 3b) [42].

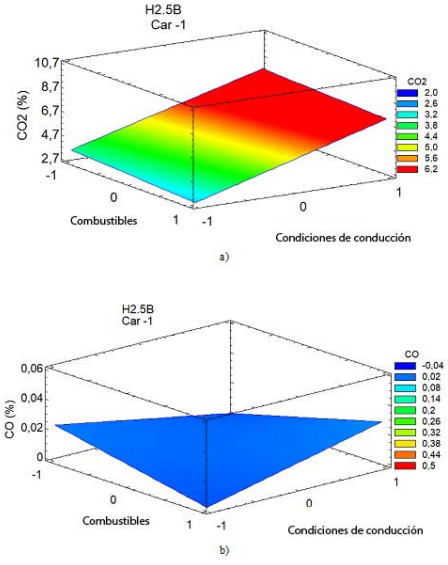

Figura 2. Emisiones de CO_2 (a) y emisiones de CO (b) del vehículo H2.5B en función del tipo de combustible y las condiciones de conducción

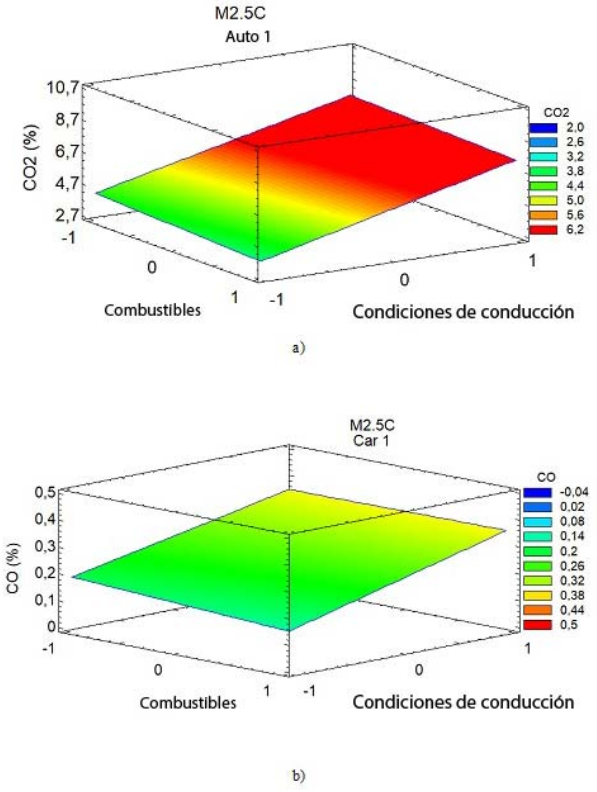

Figura 3. Emisiones de CO_2 (a) y emisiones de CO (b) del vehículo M 2.5C en función del tipo de combustible y las condiciones de conducción

El diagrama de Pareto presentado en la Figura 4 muestra la influencia relativa de los factores experimentales sobre las emisiones de CO_2. El diagrama incluye los efectos principales y las interacciones de dos factores: AC (vehículo–condición de conducción), BC (combustible–condición de conducción) y AB (vehículo–combustible). Entre estos, las condiciones de conducción surgieron como el factor más significativo que influye en los niveles de CO_2 . Este resultado se ve respaldado además por las tendencias mostradas en la Figura 5.

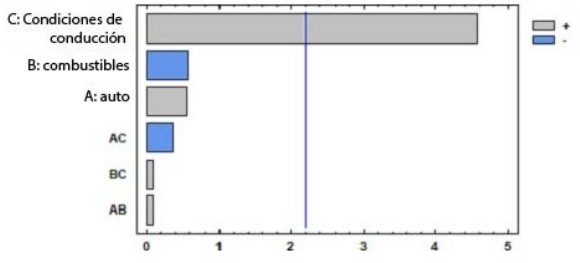

Figura 4. Efectos de los factores sobre las emisiones de CO_2.

En el caso de las emisiones de CO, las variables más influyentes fueron el tipo de vehículo, las condiciones de conducción y su interacción, como se observa en la Figura 6.

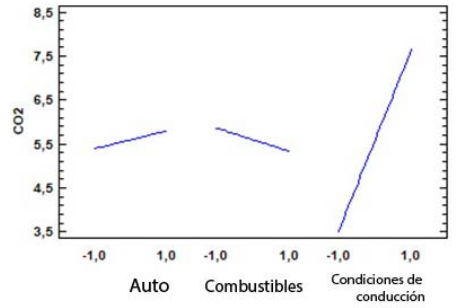

Figura 5. Efectos principales de los factores sobre las emisiones de CO_2

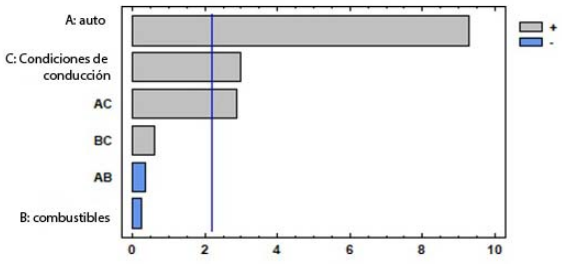

Figura 6. Efectos de los factores sobre las emisiones de CO

3.2. Análisis experimental de las emisiones de HC

La Figura 7 muestra el comportamiento de las emisiones de hidrocarburos (HC) del vehículo H2.5B (motor con bomba de inyección de 2.5 L) en función del tipo de combustible y la condición de conducción. Las concentraciones más bajas de HC se registraron al utilizar diésel convencional, independientemente de la condición de conducción, lo que sugiere que en esta configuración vehicular, el tipo de combustible tiene una mayor influencia sobre las emisiones de HC que el modo de operación.

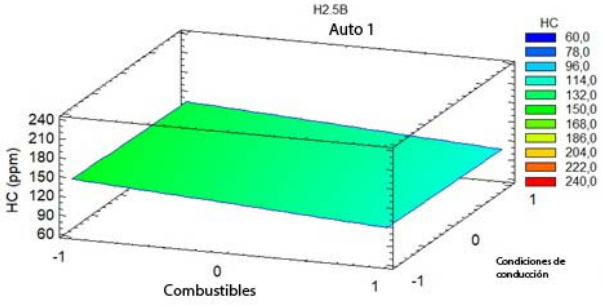

Figura 7. Comportamiento de las emisiones de HC en el vehículo H2.5B en relación con el combustible y las condiciones de conducción

En contraste, el vehículo M2.5C (motor CRDI de 2.5 L) presentó una tendencia diferente, como se observa en la Figura 8. Las emisiones más bajas de HC

se obtuvieron al operar con biodiésel B20 durante condiciones de ascenso.

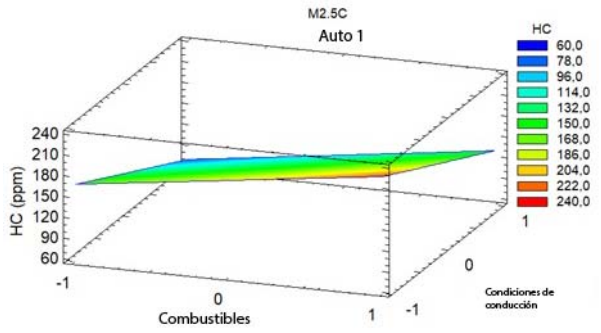

Figura 8. Comportamiento de las emisiones de HC en el vehículo M2.5C en relación con el combustible y las condiciones de conducción

El diagrama de Pareto de la Figura 9 muestra la influencia de los factores en las emisiones de HC, donde las condiciones de conducción y la interacción del tipo de automóvil con el tipo de combustible y las condiciones de conducción son los más relevantes. En la Figura 10 se muestran por separado los efectos de cada una de las variables sobre el efecto evaluado.

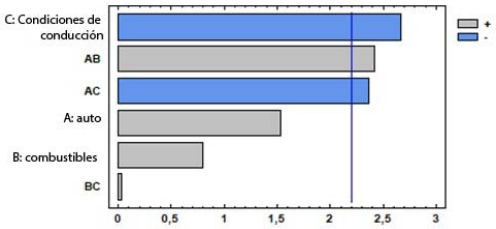

Figura 9. Efectos de los factores sobre las emisiones de HC

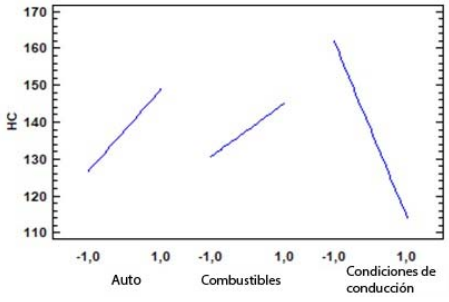

Figura 10. Efectos principales de los factores sobre las emisiones de HC

3.3. Análisis experimental de las emisiones de NO_x

La Figura 11 muestra el comportamiento de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de los vehículos M2.5C (CRDI de 2.5 L) y H2.5B (bomba de inyección de 2.5 L) en función del tipo de combustible y la condición de conducción. Las emisiones más bajas de NO_x se registraron durante las condiciones de descenso, sin que el tipo de combustible mostrara un efecto estadísticamente significativo en este contexto.

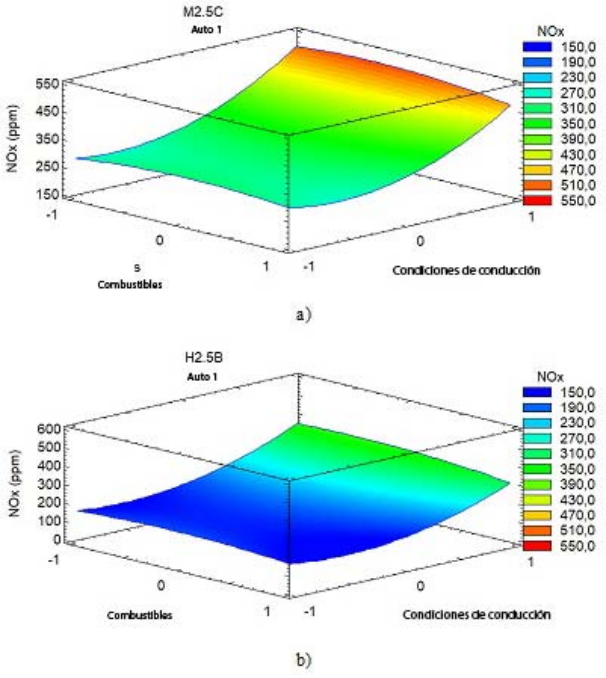

Figura 11. Emisiones de NO_x en función del tipo de combustible y las condiciones de conducción para el vehículo M2.5C (a) y el vehículo H2.5B (b).

Estudios previos, como el de Rocha-Hoyos et al. [26], han reportado que la combustión de biodiésel tiende a reducir material particulado, el monóxido de carbono y la opacidad del humo, mientras que incrementa ligeramente las emisiones de NO_x en comparación con el diésel convencional. De manera similar, los hallazgos de Tesfa et al. [29] sugieren que el uso de biodiésel generalmente resulta en niveles elevados de NO_x, independientemente de la fuente de materia prima.

Sin embargo, en el presente estudio, los incrementos observados no fueron estadísticamente significativos, probablemente debido a las condiciones de conducción en altitud elevada y al enfoque de medición en condiciones reales, que reflejan con mayor precisión la operación efectiva del vehículo en comparación con las pruebas de laboratorio. Se han propuesto estrategias adicionales, como la mezcla de biodiésel con etanol, para mitigar de forma más eficaz las emisiones de NO_x [43].

4. Conclusiones

La caracterización química del aceite de fritura usado reveló un número de cetano de 47, lo que confirma su

idoneidad para la producción de biodiésel mediante transesterificación.

Las mezclas de biodiésel (B10 y B20) cumplieron con los criterios de calidad establecidos por la Norma INEN 1489:2012, validando su potencial como combustibles alternativos en motores de encendido por compresión.

Las emisiones de CO_2 y CO de los vehículos H2.5B y M2.5C fueron menores bajo condiciones de descenso, al utilizar combustibles diésel convencionales. Este comportamiento se atribuye a la reducción de la carga del motor, la operación en modo de desaceleración o corte de inyección, y una mejora general en la eficiencia de combustión en tales escenarios.

Las emisiones de hidrocarburos se minimizaron durante el ascenso al utilizar biodiésel B20 en ambos vehículos. El mayor contenido de oxígeno en el biodiésel probablemente mejoró la combustión bajo condiciones de alta carga, reduciendo así los hidrocarburos no quemados.

Las emisiones de NO_x también fueron menores durante el descenso, independientemente del tipo de combustible, debido a la disminución de la temperatura en la cámara de combustión y la menor carga del motor en dichas condiciones operativas.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a las siguientes instituciones por el apoyo brindado durante la fase experimental de este estudio: el Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica / Eficiencia, Impacto Ambiental e Innovación en Industria y Transporte de la Universidad Internacional SEK, y el Grupo de Investigación en Producción Científica con Tecnología Moderna en el Campo Automotriz (INVELECTRO) de la Facultad de Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de Chimborazo.

Rol de autores

- **Edilberto Antonio Llanes-Cedeño:** conceptualización, supervisión,curación de datos.
- **Andrés Cárdenas-Yánez:** metodología.
- **Edwin Chamba:** validación, curación de datos.
- **Juan Carlos Castelo:** redacción-borrador original.
- **Juan Carlos Rocha-Hoyos:** redacción-revisión y edición.

Referencias

[1] WHO. (2019) How air pollution is destroying our health. World Health Organization. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr1

[2] C. Henríquez and H. Romero, *Urban Climates in Latin America*. Springer International Publishing, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4

[3] H. Jorquera, L. D. Montoya, and N. Y. Rojas, *Urban Air Pollution*. Springer International Publishing, 2019, pp. 137–165. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4_7

[4] R. O. McClellan, T. W. Hesterberg, and J. C. Wall, "Evaluation of carcinogenic hazard of diesel engine exhaust needs to consider revolutionary changes in diesel technology," *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. 63, no. 2, pp. 225–258, Jul. 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2012.04.005

[5] L. D. Claxton, "The history, genotoxicity, and carcinogenicity of carbon-based fuels and their emissions. part 3: Diesel and gasoline," *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, vol. 763, pp. 30–85, Jan. 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2014.09.002

[6] L. E. Tipanluisa, A. P. Remache, C. R. Ayabaca, and S. W. Reina, "Emisiones contaminantes de un motor de gasolina funcionando a dos cotas con combustibles de dos calidades," *Información tecnológica*, vol. 28, no. 1, pp. 03–12, 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000100002

[7] D. Krajzewicz, M. Behrisch, P. Wagner, R. Luz, and M. Krumnow, *Second Generation of Pollutant Emission Models for SUMO*. Springer International Publishing, 2015, pp. 203–221. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-15024-6_12

[8] M. Balali-Mood, A. Ghorani-Azam, and B. Riahi-Zanjani, "Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in iran," *Journal of Research in Medical Sciences*, vol. 21, no. 1, p. 65, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.4103/1735-1995.189646

[9] R. J. Wild, W. P. Dubé, K. C. Aikin, S. J. Eilerman, J. A. Neuman, J. Peischl, T. B. Ryerson, and S. S. Brown, "On-road measurements of vehicle NO_2/NO_x emission ratios in Denver, Colorado, USA," *Atmospheric Environment*, vol. 148, pp. 182–189, Jan. 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.039

[10] V. Bermúdez, J. R. Serrano, P. Piqueras, J. Gómez, and S. Bender, "Analysis of the role of altitude on diesel engine performance and emissions using an atmosphere simulator," *International Journal of Engine Research*, vol. 18, no. 1–2, pp. 105–117, Jan. 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1177/1468087416679569

[11] ISO. (1975) ISO 2533:1975 - Standard Atmosphere. International Organization for Standardization. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr11

[12] L. Mena Navarrete, M. Román, E. A. Llanes Cedeño, N. Barreno, S. Mena Palacio, and J. C. Rocha-Hoyos, "Estudio de rugosidad por análisis de fourier de las toberas de inyectores en sistemas riel común (CRDI)," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, no. 4, pp. 654–662, Dec. 2018. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000400654

[13] B. Karolys, E. A. Cedeño, W. Vega, S. Cevallos, and J. Rocha-Hoyos, "Effect of injection parameters and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine in height conditions: A review," *Journal of Engineering Science and Technology Review*, pp. 164–171, 08 2019. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr14

[14] G. Triantafyllopoulos, A. Dimaratos, L. Ntziachristos, Y. Bernard, J. Dornoff, and Z. Samaras, "A study on the CO_2 and NO_x emissions performance of Euro 6 diesel vehicles under various chassis dynamometer and on-road conditions including latest regulatory provisions," *Science of The Total Environment*, vol. 666, pp. 337–346, May 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.144

[15] L. Ntziachristos, G. Papadimitriou, N. Ligterink, and S. Hausberger, "Implications of diesel emissions control failures to emission factors and road transport NO_x evolution," *Atmospheric Environment*, vol. 141, pp. 542–551, Sep. 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.036

[16] Z. Kan, Z. Hu, D. Lou, P. Tan, Z. Cao, and Z. Yang, "Effects of altitude on combustion and ignition characteristics of speed-up period during cold start in a diesel engine," *Energy*, vol. 150, pp. 164–175, May 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.103

[17] G. Fontaras, B. Ciuffo, N. Zacharof, S. Tsiakmakis, A. Marotta, J. Pavlovic, and K. Anagnostopoulos, "The difference between reported and real-world CO_2 emissions: How much improvement can be expected by WLTP introduction?" *Transportation Research Procedia*, vol. 25, pp. 3933–3943, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.333

[18] E. A. Llanes Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, D. B. Peralta Zurita, and J. C. Leguísamo Milla, "Evaluación de emisiones de gases en un vehículo liviano a gasolina en condiciones de altura. Caso de estudio Quito, Ecuador," *Enfoque UTE*, vol. 9, no. 2, pp. 149–158, Jun. 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V9N2.201

[19] M. Kousoulidou, G. Fontaras, L. Ntziachristos, P. Bonnel, Z. Samaras, and P. Dilara, "Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors," *Atmospheric Environment*, vol. 64, pp. 329–338, Jan. 2013. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.062

[20] W. Litwin, W. Leśniewski, D. Piątek, and K. Niklas, "Experimental research on the energy efficiency of a parallel hybrid drive for an inland ship," *Energies*, vol. 12, no. 9, p. 1675, May 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en12091675

[21] A. Ashraful, H. Masjuki, M. Kalam, I. Rizwanul Fattah, S. Imtenan, S. Shahir, and H. Mobarak, "Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 202–228, Apr. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.037

[22] F. S. Mirhashemi and H. Sadrnia, "Nox emissions of compression ignition engines fueled with various biodiesel blends: A review," *Journal of the Energy Institute*, vol. 93, no. 1, pp. 129–151, Feb. 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.04.003

[23] S. Dharma, H. C. Ong, H. Masjuki, A. Sebayang, and A. Silitonga, "An overview of engine durability and compatibility using biodiesel–bioethanol–diesel blends in compression-ignition engines," *Energy Conversion and Management*, vol. 128, pp. 66–81, Nov. 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.072

[24] H. How, H. Masjuki, M. Kalam, and Y. Teoh, "Influence of injection timing and split injection strategies on performance, emissions, and combustion characteristics of diesel engine fueled

with biodiesel blended fuels," *Fuel*, vol. 213, pp. 106–114, Feb. 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.102

[25] A. Gharehghani, M. Mirsalim, and R. Hosseini, "Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission," *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 930–936, Feb. 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.045

[26] J. C. Rocha-Hoyos, E. A. Llanes-Cedeño, S. F. Celi-Ortega, and D. C. Peralta-Zurita, "Efecto de la adición de biodiésel en el rendimiento y la opacidad de un motor diésel," *Información tecnológica*, vol. 30, no. 3, pp. 137–146, Jun. 2019. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000300137

[27] M. Kousoulidou, G. Fontaras, L. Ntziachristos, and Z. Samaras, "Biodiesel blend effects on common-rail diesel combustion and emissions," *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3442–3449, Nov. 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.034

[28] K. J. Godri Pollitt, D. Chhan, K. Rais, K. Pan, and J. S. Wallace, "Biodiesel fuels: A greener diesel? A review from a health perspective," *Science of The Total Environment*, vol. 688, pp. 1036–1055, Oct. 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.002

[29] B. Tesfa, F. Gu, R. Mishra, and A. Ball, "Emission characteristics of a CI engine running with a range of biodiesel feedstocks," *Energies*, vol. 7, no. 1, pp. 334–350, Jan. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en7010334

[30] J. Medrano-Barboza, K. Herrera-Rengifo, A. Aguirre-Bravo, J. R. Ramírez-Iglesias, R. Rodríguez, and V. Morales, "Pig slaughterhouse wastewater: Medium culture for microalgae biomass generation as raw material in biofuel industries," *Water*, vol. 14, no. 19, p. 3016, Sep. 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/w14193016

[31] A. Broch, U. Jena, S. Hoekman, and J. Langford, "Analysis of solid and aqueous phase products from hydrothermal carbonization of whole and lipid-extracted algae," *Energies*, vol. 7, no. 1, pp. 62–79, Dec. 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en7010062

[32] A. Demirbas, "Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 4, pp. 923–927, Apr. 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.023

[33] G. Knothe, J. Krahl, and J. Van Gerpen, *The Biodiesel Handbook*, 2nd ed. Urbana, IL, USA: AOCS Press/Academic Press, 2010. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr33

[34] A. K. Bhonsle, A. Kumar, A. Ray, J. Singh, N. Rawat, and N. Atray, "Biodiesel production from used cooking oil at room temperature using novel solvent – a techno-economic perspective, sensitivity analysis and societal implications," *Energy Conversion and Management*, vol. 324, p. 119282, Jan. 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119282

[35] C. F. Morales-Bayetero, E. A. Llanes-Cedeño, C. Mafla-Yépez, and A. Rodríguez-Rodríguez, "Assessment of the mechanical and environmental behavior of diesel engines operating with biodiesel mixtures," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, Feb. 2023.

[36] F. E. Quinchimbla Pisuña and J. M. Solís Santamaría, *Development of city, road and combined driving cycles to evaluate the actual fuel performance of an Otto cycle-powered vehicle in the Metropolitan District of Quito. 2017.* Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2017. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr37

[37] J. I. Huertas, M. Giraldo, L. F. Quirama, and J. Díaz, "Driving cycles based on fuel consumption," *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3064, Nov. 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en11113064

[38] J. C. Leguísamo, E. A. Llanes-Cedeño, S. F. Celi-Ortega, and J. C. Rocha-Hoyos, "Evaluación de la conducción eficiente en un motor de encendido provocado, a 2810 msnm," *Información tecnológica*, vol. 31, no. 1, pp. 227–236, Feb. 2020. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100227

[39] J. R. Serrano, P. Piqueras, A. Abbad, R. Tabet, S. Bender, and J. Gómez, "Impact on reduction of pollutant emissions from passenger cars when replacing Euro 4 with Euro 6d diesel engines considering the altitude influence," *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1278, Apr. 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en12071278

[40] V. Kolanjiappan, "Reduction of amine and biological antioxidants on NO_x emissions powered by mango seed biodiesel," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 84, pp. 46–54, Sep. 2017. [Online]. Available: http://doi.org/10.17533/udea.redin.n84a06

[41] Y. Guardia-Puebla, J. Márquez-Delgado, V. Sánchez-Girón, E. A. Llanes-Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, and D. B. Peralta-Zurita, "Enhancements to the subject statistical design of experiments for students of the mechanical engineering career," *Revista ESPACIOS*, vol. 39, no. 30, p. 10, 2018, [En línea]. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr42

[42] G. Belgiorno, G. Di Blasio, S. Shamun, C. Beatrice, P. Tunestål, and M. Tunér, "Performance and emissions of diesel-gasoline-ethanol blends in a light duty compression ignition engine," *Fuel*, vol. 217, pp. 78–90, Apr. 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.090

[43] H.-H. Riojas-González, L.-J. Bortoni-Anzures, J.-J. Martínez-Torres, and H. A. Ruiz, "Avances y estrategias para mejorar el desempeño del biodiésel en motor diésel," *Ingenius*, no. 30, pp. 90–105, Jul. 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.08