

Pruebas de larga duración con biodiésel de palma en una flota de camiones de transporte

Long-term tests with palm biodiesel in a fleet of transportation trucks



Autores

Johan A. Reyes B.

Líder del Proyecto Biodiésel
(Cenipalma)

Jesús A. García-Núñez

Coordinador Programa
Procesamiento (Cenipalma)

Darlis Varón C.

Auxiliar de Investigación del
Proyecto biodiésel (Cenipalma)

Ronald Carranza S.

Auxiliar de Investigación del
Proyecto Biodiésel (Cenipalma)

Julia R. Acero R.

Profesional 1 A Unidad de
Investigación (ICP-Ecopetrol)

José A. Sarmiento

Profesional Unidad Disciplinas
Especializadas (ICP-Ecopetrol)

José L. Sarmiento

Profesional Unidad Servicios
Técnicos (ICP-Ecopetrol)

Elkin Espitia F.

Coordinador Regulaciones
(General Motors Colmotores)

Henry García G.

Supervisor PEM y Regulaciones
(General Motors Colmotores)

Santiago Ávila

Ingeniero de Pruebas de Carretera
(General Motors Colmotores)

Palabras clave

Características de mezclas de combustibles,
evaluaciones de desempeño, condiciones
mecánicas del motor, emisiones al medio
ambiente.

Characteristics of fuel mixtures, performance
evaluations, mechanical condition of engine,
environmental emissions.

Recibido: 20 julio 2011
Aceptado: 19 septiembre 2011

Resumen

Se llevó a cabo una prueba de larga duración (100.000 km/camión) para evaluar el desempeño de las mezclas diésel-biodiésel de palma (B5, B10, B20) en nueve vehículos Chevrolet NKR III pertenecientes a la flota de Coordinadora Mercantil, ensamblados por General Motors Colmotores. Estos vehículos representaron cerca de 60% de participación en el segmento de camiones livianos del parque automotor circulante en el país, lo que hizo que esta prueba, que se realizó bajo condiciones reales de operación de los vehículos, en rutas intermunicipales y urbanas en Bogotá (hasta 2.600 metros sobre el nivel del mar) con más de 900.000 km recorridos, fuera representativa en el panorama nacional. Los resultados obtenidos mostraron que el desempeño y consumo de combustible de los vehículos que utilizaron las mezclas diésel-biodiésel (B10 y B20) fueron muy similares a los vehículos que utilizaron la mezcla diésel-biodiésel (B5, vehículos de control). Además, mostraron beneficios ambientales como la reducción en el índice de opacidad, monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y material particulado. Las revisiones mecánicas realizadas a los sistemas de inyección permitieron verificar que no se presentaron desgastes anormales en las piezas por el uso de las mezclas diésel-biodiésel de palma.

Abstract

A long-term test (100,000 km/truck) was carried out in order to evaluate the performance of blends of diesel and palm biodiesel (B5, B10, B20) in nine Chevrolet NKR III vehicles that are part of the Coordinadora Mercantil fleet and supplied by General Motors Colmotores. These vehicles represent about 60% of the total Colombian fleet in the light truck segment. Trucks operated under real operating conditions in intercity and urban routes in Bogotá (up to 2,600 meters above sea level) for more than 900,000 km. The results showed that the performance and fuel consumption of the vehicles using the biodiesel blends (B10 and B20) were very similar to those of the

vehicles using the biodiesel blends (B5, control vehicles). In addition, palm oil biodiesel blends showed environmental benefits such as reduction on opacity index, carbon monoxide, hydrocarbon and particulate matter emissions. Mechanical inspections of the injection systems of the vehicles showed that the use of fuel blends of diesel-palm biodiesel did not influence the wear and tear of the pieces found on the injection pumps.



Introducción

Una de las materias primas más utilizadas como combustibles alternativos son los aceites vegetales transformados químicamente (ésteres metílicos de ácidos grasos conocidos como biodiésel) que pueden ser utilizados como combustibles diésel (Ameer et ál, 2009). En el mundo, el más usado es el aceite de colza, con una participación del 80% en el mercado, pero también se conocen experiencias con aceite de girasol, soya (Estados Unidos) y palma (Malasia). Teniendo en cuenta la disponibilidad y el costo de estos aceites se podría pensar que el aceite de palma lograría, a futuro, ser el candidato más adecuado y atractivo como fuente de biodiésel (Mesa, 2008).

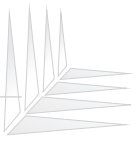
El biodiésel puede ser utilizado en mezclas con diésel manteniendo características muy similares, tiene mejores propiedades que el diésel como renovables, biodegradables, no-tóxicas y, esencialmente, libre de azufre y aromáticos (Karavalakis et ál, 2010). El biodiésel se ha vuelto más atractivo debido a sus beneficios medioambientales y al hecho de que se obtiene a partir de recursos renovables (Knothe, 2010). Además, contiene aproximadamente 10% de oxígeno en peso mejorando la eficiencia de la combustión al ocupar espacio en la mezcla y por lo tanto, aumenta ligeramente la tasa aparente de consumo de combustible al operar un motor con biodiésel (Demirbas, 2009).

El uso del biodiésel al operar en motores diésel muestra una ligera reducción en la potencia del *brake* y un ligero aumento en el consumo de combustible. Sin embargo, las propiedades lubri-

cantes del biodiésel son mejores que las del diésel, aumentando la vida útil del motor (Kapilan et ál, 2009). El rendimiento del biodiésel puede superar el del combustible diésel pero su aplicación no requiere de motores modificados. Además, se crean oportunidades de trabajo y aumentan los ingresos de la población especialmente en las comunidades donde se producen estas materias primas (Atadashi et ál, 2010).

En Colombia, durante los últimos años el Gobierno ha promovido el uso de biocombustibles derivados de fuentes renovables, especialmente de aceites vegetales y azúcares fermentables. El hecho que el biodiésel de palma sea una alternativa para sustituir de forma parcial los combustibles fósiles, se ha convertido en un tema de gran importancia para el país que involucra a sectores agroindustriales, de transporte y de distribución de combustibles. Además, ha representado una gran oportunidad para el sector palmicultor porque ha permitido incrementar el consumo interno de aceite de palma y darle mayor valor agregado. El Programa Nacional de Biodiésel de Palma inició con éxito su implementación desde el 2004 con la expedición de la ley 939 y tiene tres objetivos fundamentales: desarrollo del sector agrícola – con énfasis en la generación de empleo rural estable –, diversificación de la canasta energética y contribución a disminuir el impacto ambiental de los combustibles fósiles (Cuéllar, 2010).

Teniendo en cuenta lo anterior, en junio del 2005 se inició el primer convenio de cooperación



técnica entre Ecopetrol-ICP y Cenipalma con el objetivo de desarrollar conjuntamente esfuerzos para definir la caracterización fisicoquímica de las mezclas de aceite de palma y biodiésel con diésel; evaluación de las mezclas en motores y vehículo de prueba y realización de pruebas de larga duración con flotas de vehículos. Los resultados de esta primera etapa realizada en laboratorio, demostraron que el biodiésel de palma puro o en mezclas con el combustible diésel no tiene efectos negativos en el motor y su uso disminuye apreciablemente las emisiones de material particulado, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono (Cuéllar y Torres, 2007).

Posteriormente, se diseñó una segunda etapa para validar los resultados obtenidos en la etapa 1, realizando pruebas de larga duración con mezclas de diésel y biodiésel de aceite de palma (5 al 50%) en el sistema de transporte masivo de Bogotá (Transmilenio), lo cual permitió evaluar además del desempeño en el motor, el efecto que tiene el uso del biodiésel de palma en los componentes del sistema de inyección que están en contacto con el combustible. Se obtuvieron resultados satisfactorios a nivel de desempeño y ambiental en una exigente prueba a una altura de 2.600 metros sobre el nivel del mar y condiciones de temperatura promedio de 14°C (Amado et al, 2008).

En esta tercera etapa de pruebas se tuvo por objetivo evaluar los efectos de las mezclas diésel-biodiésel en nueve vehículos Chevrolet NKR III pertenecientes a la flota de Coordinadora Mercantil y suministrados por General Motors Colmotores que cubrieron rutas en Bogotá e intermunicipales, para operar durante 100.000 km, utilizando mezclas diésel-biodiésel de palma en porcentajes del 10% (B10) y 20% (B20), incluyendo tres camiones de control con el porcentaje de mezcla del 5% (B5). Adicionalmente, para esta fase se contó con un vehículo adicional Chevrolet NKR III perteneciente a General Motors-Colmotores, con el cual se realizaron pruebas especiales de desempeño y evaluación de emisiones en chasis dinamométrico. Este artículo contiene los principales resultados de esta prueba de larga duración.

Metodología

La metodología consistió en varias etapas y se diseñó de acuerdo con las actividades establecidas

en los términos de referencia definidos para el proyecto, ejecutadas desde febrero de 2009 hasta noviembre de 2010.

La primera etapa consistió en la construcción de la estación de almacenamiento y mezcla de combustibles con optimización de su funcionamiento y operación; y las etapas posteriores: control de calidad al biodiésel de palma y sus mezclas; seguimiento al desempeño de las mezclas diésel-biodiésel de palma; revisiones mecánicas a los componentes internos del motor; pruebas adicionales de desempeño y evaluación de emisiones.

Las principales actividades de este proyecto consistieron en el funcionamiento de la estación de almacenamiento y mezcla de combustibles; control de calidad para los combustibles y las mezclas diésel-biodiésel de palma empleadas en la prueba; seguimiento de los parámetros de consumo, opacidad, análisis de aceite lubricante para los vehículos de prueba; videoscopías de la cámara de combustión, revisión de los sistemas de inyección a los primeros 50.000 km y al finalizar los 100.000 km de prueba, análisis de toberas de inyección por microscopía electrónica de barrido (SEM); pruebas especiales de desempeño y evaluación de emisiones en chasis dinamométrico.

En la Figura 1 se describen las actividades de seguimiento y operación llevadas a cabo. Como se aprecia, el continuo seguimiento técnico a los combustibles y a los motores facilitó la evaluación del desempeño de los nueve camiones. Las labores de auditoría, que estuvieron a cargo de la Universidad de Antioquia, validaron la metodología y los resultados presentados en este documento.

Resultados

A continuación se describen los principales resultados obtenidos durante la ejecución de la prueba de larga duración con las mezclas diésel-biodiésel.

1. Funcionamiento de la estación de almacenamiento y mezcla de combustibles

Con el objetivo de facilitar el suministro de combustible a los vehículos de la prueba fue necesario realizar la construcción de una estación de almacenamiento de combustibles que permitiera suministrar la mezcla adecuada de diésel-biodiésel de palma en proporción de 5, 10 y 20% a los vehículos seleccionados.



Figura 1. Actividades desarrolladas durante la prueba.

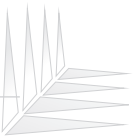
La planta contó con dos tanques de almacenamiento, uno para el diésel y otro para el biodiésel de palma, en este último, se tuvo adicionalmente un contenedor externo que permitió controlar la temperatura del tanque para evitar la solidificación del biodiésel de palma (Figura 2). Como este combustible puede solidificarse a temperaturas inferiores a 14°C, el contenedor del tanque fue acondicionado con un sistema de calentamiento de aire interno con el objetivo de mantener la temperatura del contenedor en el rango de 20 a 25°C,

para garantizar que el producto se mantenga líquido durante el almacenamiento.

El sistema de recibo y conducción de combustibles se diseñó para evitar la contaminación entre productos, permitiendo un manejo independiente de cada uno de los combustibles (Figura 2). En el punto de recepción se contó con elementos bridados y acoples rápidos que garantizaron la hermeticidad de la unión y disminuyeron al máximo los riesgos de derrame de producto. La línea destinada



Figura 2. Estación de almacenamiento y mezcla de combustible diésel - biodiésel de palma.



para el biodiésel de palma contó con aislamiento en fibra de vidrio y sistema de calentamiento eléctrico, con lo cual se calentó la tubería cada vez que fue necesario.

La mezcla de combustible diésel y biodiésel de palma se efectuó en línea por medio de un surtidor de combustible tipo *blender* marca Encore, modelo S500, el cual contaba con dos líneas de entrada, una proveniente del tanque de diésel y otra del tanque de biodiésel. Dos válvulas electrónicas proporcionales de flujo dosificaban la cantidad requerida de los combustibles para cada una de las mezclas seleccionadas. Adicionalmente, se contó con dos filtros para retener cualquier tipo de partícula presente.

2. Control de calidad para los combustibles y las mezclas diésel-biodiésel de palma empleadas en la prueba

Uno de los aspectos más relevantes cuando se hacen pruebas de larga duración con nuevos combustibles es garantizar que el combustible que se está probando cumpla con las especificaciones de

calidad establecidas. Los resultados encontrados en la primera y segunda etapa, demostraron que el biodiésel de palma puro o mezclado con el combustible diésel, cumplió con las especificaciones de calidad establecidas en las resoluciones 182087 y 182142, al igual que con las respectivas normas NTC 5444 y NTC 1438.

El aseguramiento de la calidad de los combustibles consistió en mantener en óptimas condiciones los combustibles puros almacenados en los tanques. La presencia de altas cantidades de agua depositada en el interior de los tanques de almacenamiento de combustible resultaron ser un punto crítico, debido a que puede originar una serie de problemas como la formación de sedimentos y desarrollo de microorganismos. Por esa razón, en la operación de la estación de almacenamiento y mezcla fue fundamental mantener una rutina de buenas prácticas de manejo para los combustibles y las mezclas diésel-biodiésel, monitoreando continuamente la presencia de agua y, cuando fue detectada, se emplearon mecanismos de control para eliminarla (Figura 3).

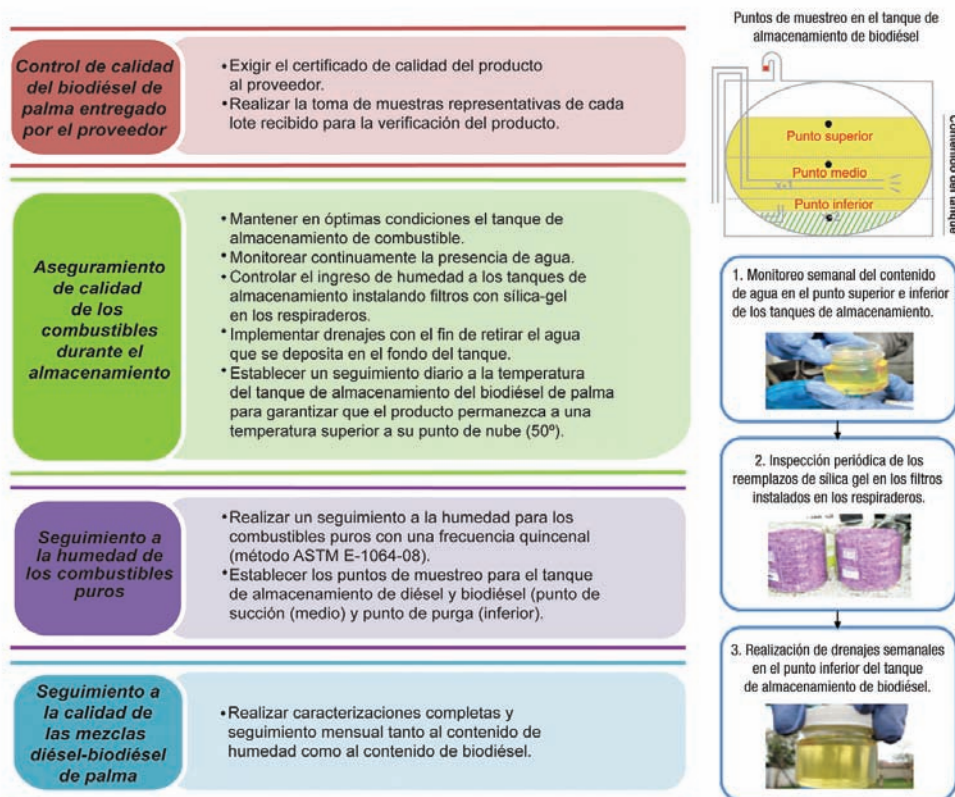


Figura 3. Buenas prácticas de manejo para los combustibles y las mezclas diésel-biodiésel de palma.

Durante el periodo de prueba no se evidenció la formación de cristales en las mezclas utilizadas, aun cuando el suministro del combustible a los vehículos se realizó en horas de la noche y en la madrugada, con temperatura ambiente alrededor de 11 y 12 °C.

Por esta razón, en esta prueba de larga duración también se contempló el cumplimiento de los estándares de calidad tanto para los combustibles puros

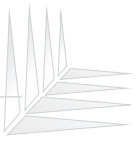
(diésel y biodiésel de palma) como para las mezclas diésel–biodiésel de palma (B5,B10 y B20).

Los resultados obtenidos en las pruebas, mostraron que el biodiésel de palma utilizado para la preparación de las mezclas–verificado por Ecopetrol-ICP y Cenipalma–cumplieron satisfactoriamente con los requisitos de calidad exigidos por la regulación nacional (Tabla 1). Asimismo las mezclas (B5, B10 y

Tabla 1. Especificaciones de calidad del biodiésel de palma utilizado en las pruebas entregadas por los proveedores en los diferentes cargues.

Propiedades	Método de análisis	Unidades	Resolución 182078 2/07	Cargue 1	Cargue 2	Cargue 3
Apariencia	Visual	Visual	---	Amarillo brillante	Amarillo brillante	Amarillo brillante
Densidad a 15 °C	ASTM D4052	kg/m ³	860-900	875	875	875
Gravedad API a 60 °F	ASTM D1298	API	Reportar	30,0	30,1	30,1
Humedad Karl Fischer	ASTM E203	ppm	500 máx.	340	259	259
Número ácido	ASTM D664	mg KOH/g	0,5 máx.	0,30	0,22	0,45
Punto de fluidez	ASTM D97	°C	Reportar	12	15	15
Glicerina libre	ASTM D6584	% masa	0,02 máx.	0,020	0,011	0,009
Glicerina total	ASTM D6584	% masa	0,25 máx.	0,18	0,14	0,19
Monoglicéridos	ASTM D6584	% masa	0,8 máx.	0,50	0,37	0,60
Diglicéridos	ASTM D6584	% masa	0,2 máx.	0,08	0,13	0,11
Triglicéridos	ASTM D6584	% masa	0,2 máx.	0,16	0,14	0,04
Contenido de metanol	EN 14110	% masa	0,2 máx.	0,04	0,07	<0.01
Contenido de Fame	EN 14103	% masa	96,50 mín.	98,50	97,20	98,59
Viscosidad a 40 °C	ASTM D445	mm ² /s	1,9-6,0	4,5	4,6	4,4
Destilación (PFE)	ASTM D86	°C	360 máx.	348	350	336
Contaminación total	EN 12662	mg/kg	24 máx.	10,6	24,0	24,0
Índice de yodo	EN 14111	g yodo/ 100g	120 máx.	53	50	55
Punto de inflamación	ASTM D93	°C	120 mín.	---	---	---

--- No analizado



B20) cumplieron con las especificaciones de calidad establecidas para el combustible diésel en Colombia, con lo cual se garantizó que tuvieran un óptimo desempeño como combustible (Tabla 2).

La humedad de las mezclas de combustible suministradas a los vehículos de prueba estuvieron por

motor Isuzu 4JB1-TC, turbo diésel de 2,8 litros con intercooler y EGR (*exhaust gas recirculation*) cumpliendo la norma de emisiones Euro II. En el mercado nacional, GM Colmotores tiene el 60% del parque automotor de ventas con NKR III, lo cual hizo representativa esta prueba de larga duración en el segmento de camiones

Tabla 2. Consolidado de los resultados de control de calidad de las mezclas diésel-biodiésel de palma utilizadas en las pruebas

Análisis	Método de ensayo	Unidades	Especificaciones		Mezcla B5			Mezcla B10			Mezcla B20		
			Mín.	Máx.	Inicio	50.000 km	100.000 km	Inicio	50.000 km	100.000 km	Inicio	50.000 km	100.000 km
Punto de Inflamación	ASTM D93-(07)	° C	52	NA	66	63	70	66	63	69	68	65	71
Estabilidad térmica	ASTM D6468 (06)	% Reflectancia	70	NA	96	98	99	95	98	98	95	98	98
Gravedad API	ASTM D4052	°API	Reportar		35,4	36,9	34,6	35,1	36,7	34,5	34,6	35,9	34,0
CFPP (C°)	ASTM D6371	° C	Reportar		-19	-20	-22	-5	-18	-20	-2	-11	-3
Punto de nube (C°)	ASTM 2500	° C	Reportar		-13	-17	-6	-10	-14	-7	-7	-9	-6
Punto de fluidez (C°)	ASTM D97	° C	NA	3	-18	-24	-15	-18	-18	-12	-9	-14	-9
PIE	ASTM D86 (07b)	° C	Reportar		170,6	173,2	173,0	170,9	171,1	178,6	176,4	173,0	173,5
50%			Reportar		272,3	262,4	280,4	276,6	267,5	285,5	285,6	276,0	292,3
95%			282	360	337,5	335,8	351,8	341,4	337,7	350,1	340,1	339,6	346,7
PFE			Reportar		350,7	345,6	359,8	349,6	342,9	360,1	349,9	343,4	357,0
Contenido de azufre	ASTM D5453 (08a)	ppm	Máx.500-1/07/2008		155	29	41	148	28	34	132	24	30
			Máx.50 1/01/2010										
Contenido de biodiésel	ICP -UST-PTE-114602	% vol	Reportar		6,8	4,9	5,9	10,3	9,5	9,8	23,4	20,9	19,8
Partículas contaminantes	ASTM D6217	mg/L	NA	10,0 ²	—	3,8	1,2	—	6,4	11,2	—	10,4	13,8
Número de ácido	ASTM D664	mg KOH/g	—	0,3 ³	—	<0,10	<0,10	—	<0,10	<0,10	—	<0,10	<0,100

— No analizado. NA: No aplica

(1) Especificaciones definidas con base en la resolución 182087 de 2007.

(2) Para este parámetro se toma como valor máximo de referencia 10 mg/L, según recomendaciones técnicas de la Asociación de Fabricantes de Motores Diésel.

(3) Especificaciones definidas con base en la norma estándar ASTM D7467 *Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blends* (B6 to B20).

debajo de 200 ppm, cumpliendo con la recomendación del comité de fabricantes de motores diésel (Figura 4). No obstante, fue evidente que la mezcla B20 registró valores mayores de humedad con respecto a las mezclas B10 y B5, comportamiento favorecido por el mayor porcentaje de biodiésel en la mezcla.

3. Seguimiento de los parámetros de consumo, opacidad y análisis de aceite lubricante para los vehículos de prueba

Los vehículos utilizados vienen equipados con

tipo liviano (Figura 5). Chevrolet NKR III, los cuales, bajo las condiciones operativas definidas por Coordinadora Mercantil y General Motors Colmotores, recorrieron más de 900.000 km de rutas municipales e intermunicipales, sirvieron para consolidar la confiabilidad del biodiésel de palma como combustible.

La prueba de larga duración comprendió 100.000 kilómetros/vehículo de operación normal con las mezclas de diésel-biodiésel de palma al 5, 10 y 20%. Durante este período se hizo seguimiento diario al kilometraje recorrido, consumo de combustible, monitoreo al índice de opacidad cada 10.000 kilómetros

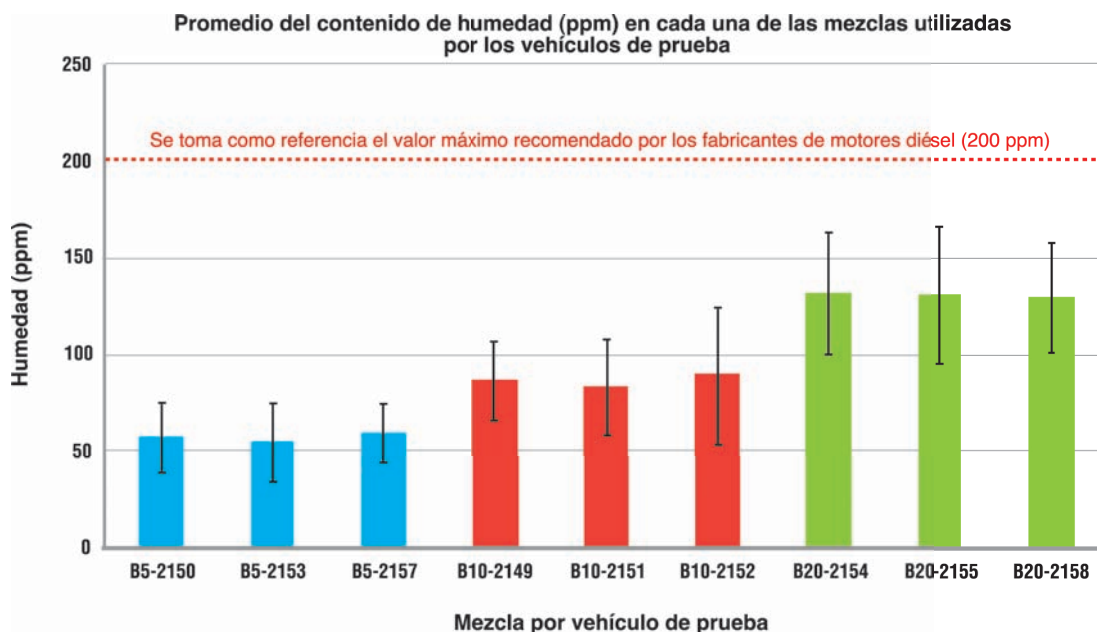


Figura 4. Seguimiento a la humedad de las mezclas diésel-biodiésel de palma.



Figura 5. Vehículo Chevrolet NKR III utilizado en las pruebas de mezclas diésel – biodiésel de palma.

y análisis de aceite lubricante de acuerdo con la frecuencia de cambio del aceite de motor.

El uso de las mezclas diésel-biodiésel de palma al 5, 10 y 20% no tuvieron diferencias significativas en el consumo de combustible durante los 100.000 km recorridos, tanto en ruta local como en rutas intermunicipales, y estuvo dentro del rango de confianza de la firma Coordinadora Mercantil (19,64 a 23,14 km/gal). Las rutas en Bogotá se designaron como locales y, como intermunicipales, las de Chiquinquirá, Duitama, Fusagasugá, Facatativá, Madrid, Sogamoso, Duitama, Villavicencio y Tunja. El rendimiento de combustible mantuvo un comportamiento satisfactorio con el uso de las mezclas diésel-biodiésel de palma (rango pro-

medio de 20,34 km/gal para tráfico en ciudad y 22,05 km/gal en carretera) (Figura 6).

La opacidad de los humos de escape es la medida que regula las autoridades ambientales para las fuentes móviles equipadas con motores diésel (valor máximo legal del 28%) determinado por la norma NTC 4231. En la Figura 7, se observan las opacidades promedio de las mezclas; los resultados muestran que la opacidad se mantuvo por debajo del límite permitido para fuentes de emisiones diésel a nivel nacional (28%) y en la ciudad de Bogotá (25,2%).

A diferencia de las anteriores fases de estudio, para estas pruebas el diésel fósil tuvo una influencia importante en los resultados obtenidos con respecto al contenido de azufre, porque desde enero de 2010 se empezó a recibir en la Terminal de Coordinadora Mercantil diésel ultra bajo azufre (≤ 50 ppm), para la preparación de las mezclas de acuerdo con la reglamentación establecida por el Ministerio de Minas y Energía para la ciudad de Bogotá.

Las frecuencias de cambio de aceite lubricante se encontraron dentro de los límites fijados por el fabricante, a través del seguimiento de sus parámetros como metales de desgaste: hierro (Fe), cromo (Cr), cobre (Cu), silicio (Si) y aluminio (Al) (Norma ASTM D6595-00); propiedades fisicoquímicas: viscosidad, nivel de volátiles, contenido de agua, glicol y TAN (Norma ASTM D445-09) y presencia de contaminantes:

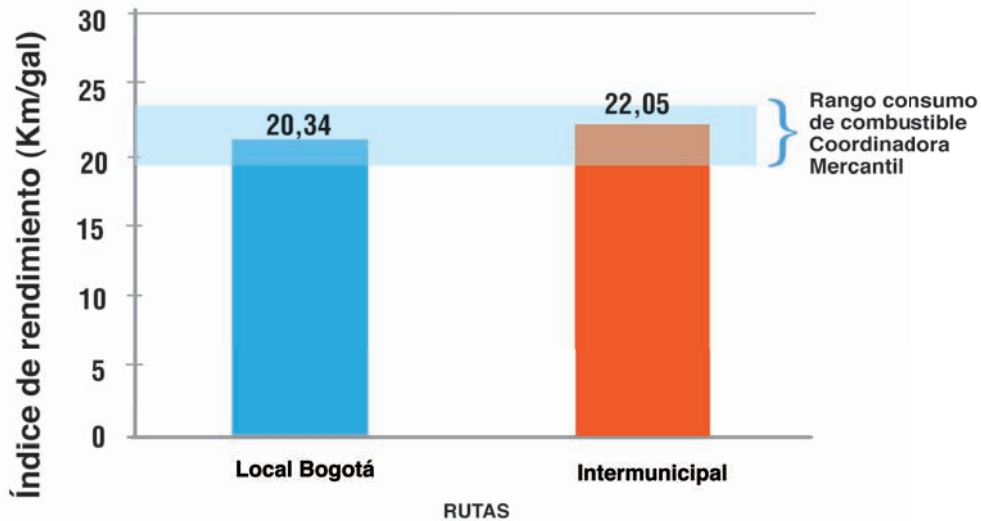


Figura 6. Índice de rendimiento de combustible de las mezclas empleadas en las rutas.

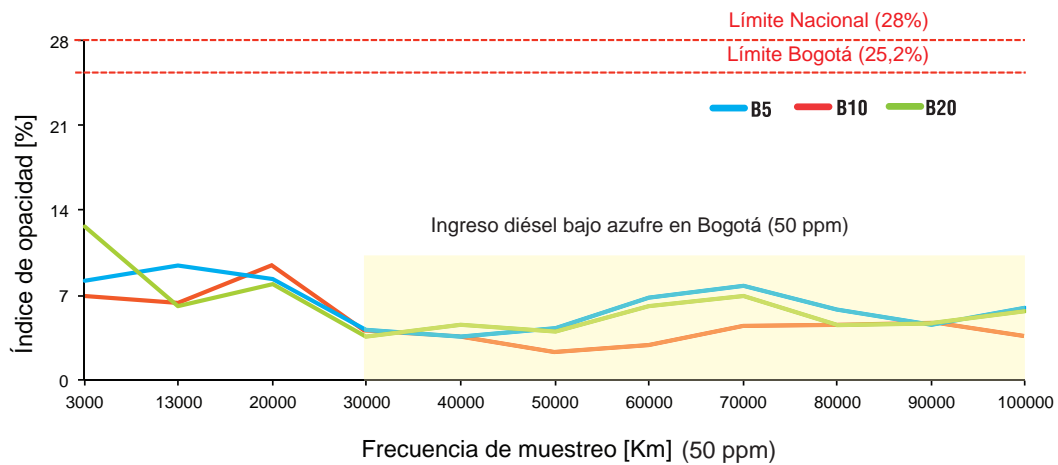


Figura 7. Promedio de opacidad cada 10.000 km para cada mezcla.

nitricación, sulfatación y hollín (Norma ASTM E2412-04).

Los resultados de los análisis del aceite lubricante mostraron que sus propiedades no fueron afectadas por el uso de las mezclas de combustible utilizadas, incluso al aumentar el kilometraje de uso de 5.000 hasta 8.000 km, se comportó dentro de los límites permitidos por el fabricante para este tipo de motores y operación.

Metales de desgaste

En la Figura 8 se muestra el promedio de hierro (Fe) por mezcla (B5, B10 y B20). El contenido de hierro durante los muestreos reportó niveles de concentración bajos con respecto a los límites de precaución y superior; se observó una tendencia a una menor concentración de hierro por desgaste con el uso de las mezclas al 20%. Los niveles de concentración de

los otros metales de desgaste como aluminio, cromo, silicio y cobre se reportaron bajos, inferiores a los límites permitidos por el fabricante.

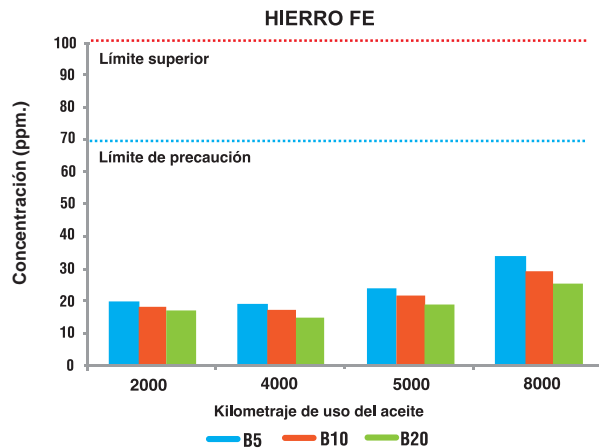


Figura 8. Contenido de hierro.

Propiedades fisicoquímicas

Los resultados del seguimiento a los parámetros de viscosidad cinemática (100°C), volátiles, contenido de agua, glicol y TAN (Número Total Ácido), mostraron el comportamiento esperado y dentro del rango dado por el fabricante para el tipo de operación de los vehículos. El parámetro TAN fue indicativo de la degradación del aceite, espesamiento del aceite, corrosión de los componentes metálicos y promotores de la oxidación. Los resultados mostraron que el aceite lubricante mantuvo un comportamiento estable sin llegar a los límites de precaución y superior (Figura 9).

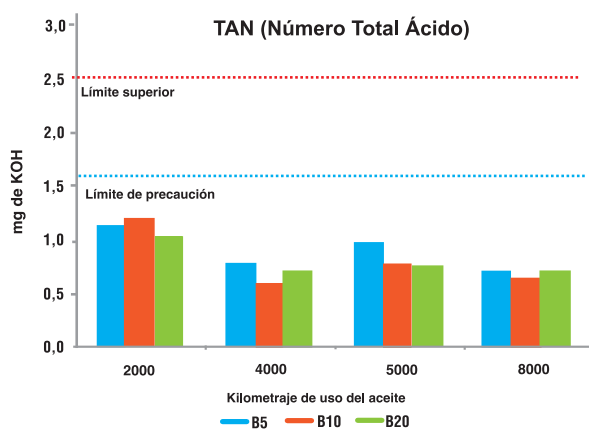


Figura 9. Número Total Ácido

Presencia de contaminantes

Los contaminantes evaluados en el aceite lubricante como el hollín (Figura 10), sulfatación y nitración reportaron niveles por debajo de lo sugerido por el fabricante del aceite.

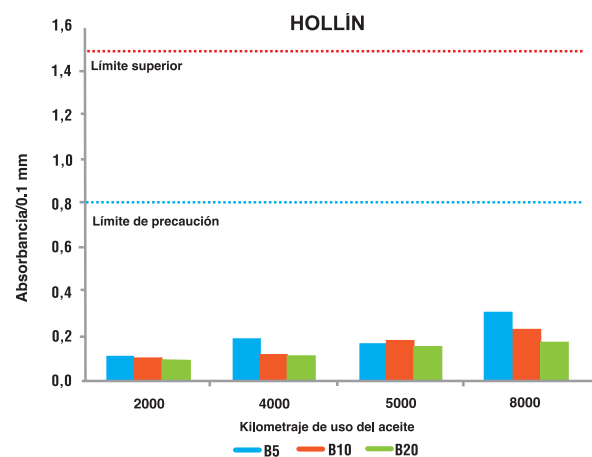


Figura 10. Contenido de hollín

4. Videoscopías de la cámara de combustión, revisión de los sistemas de inyección y análisis de toberas por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se evaluó el estado mecánico de cada vehículo por medio de videoscopías al conjunto de la cámara de combustión e inspecciones visuales a los inyectores cada 25.000 kilómetros. Al completar 50.000 km, se realizó una inspección de los sistemas de inyección a tres de los nueve vehículos, uno de cada porcentaje de mezcla (B5, B10 y B20). A 100.000 km de prueba se realizó la inspección final a los sistemas de inyección a seis de los nueve vehículos de prueba, tres de los cuales habían sido evaluados a los 50.000 km y se incluyó una inspección a los tanques de combustible principal y auxiliar de un vehículo por mezcla.

Las inspecciones a los componentes internos del motor por medio de videoscopías mostraron que el conjunto pistón cilindro mejoró su apariencia interna sin la presencia de hollín acumulado en la cabeza del pistón. Se observó una mayor limpieza en la cámara de combustión, en asientos de válvulas de admisión y de escape (Figura 11).

Las videoscopías mostraron una apariencia normal de las partes internas del motor como cilindros, asientos y tapas de válvulas, las cuales se hallaron limpias y libres de residuos de combustión. Las revisiones mecánicas realizadas a los sistemas de inyección permitieron verificar que no se presentaron desgastes anormales en las piezas por el uso de las mezclas diésel-biodiésel de palma, junto con los componentes internos de los inyectores como toberas, agujas y discos intermedios, que también mostraron normalidad de acuerdo con el kilometraje de uso (Figura 12).

Los análisis de toberas fueron realizados por la Universidad de Antioquia para determinar el desgaste interno de una tobera de inyección de un vehículo por mezcla, comparadas con una tobera nueva proporcionada por el fabricante GM-Colmotores. En primer lugar, se sacaron moldes internos (negativos) de cada tobera y se tomaron fotografías con un microscopio electrónico de barrido (SEM por su sigla en inglés) para determinar cuantitativamente su desgaste (Figura 13). Los resultados de la comparación entre las toberas nuevas y las de 100.000 km mostraron variaciones dimensionales dentro de los rangos normales.

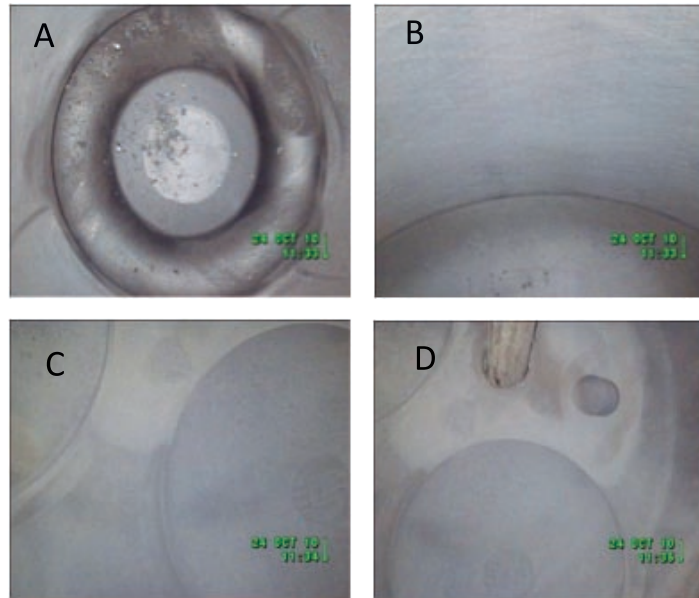


Figura 11. Cabeza de pistón (A), pared del cilindro (B), asientos de las válvulas (CD)

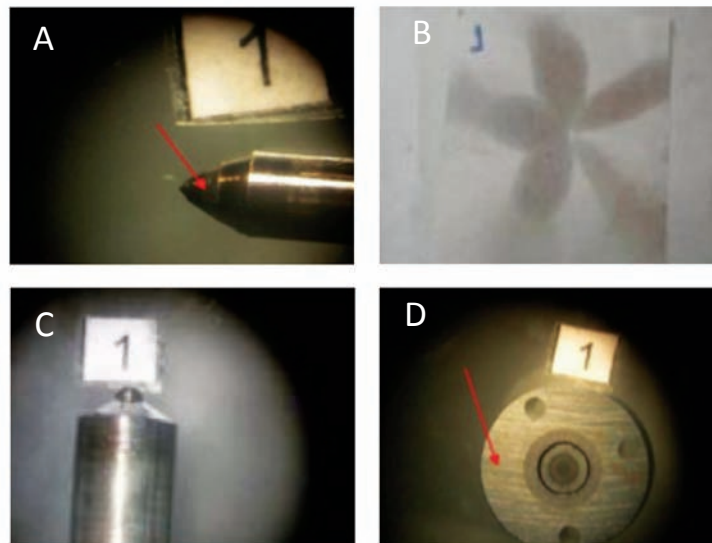


Figura 12. Conjunto de piezas internas del inyector de combustible. (A. Toberas de inyección; B. Pulverización tobera; C. Punta de aguja de inyección; D. Superficie disco intermedio).

Se observó disminución del diámetro de la tobera entre 8 y 14 μm debido probablemente a los depósitos de carbonilla con respecto a la nueva. Los desgastes se consideran normales y acordes con el kilometraje de uso independiente del tipo de combustible utilizado.

5. Pruebas especiales de desempeño y evaluación de emisiones en chasis dinamométrico

Las pruebas especiales de desempeño consistieron en la evaluación de desempeño del vehículo Chevrolet NKR III perteneciente a GM-Colmotores, usando las tres mezclas que utilizaron los vehículos en las pruebas de larga duración (B5, B10 y B20), según procedimientos estandarizados del fabricante. Se evaluaron los parámetros de rendimiento en carretera plana (*Flat Road Performance*), pendiente superable

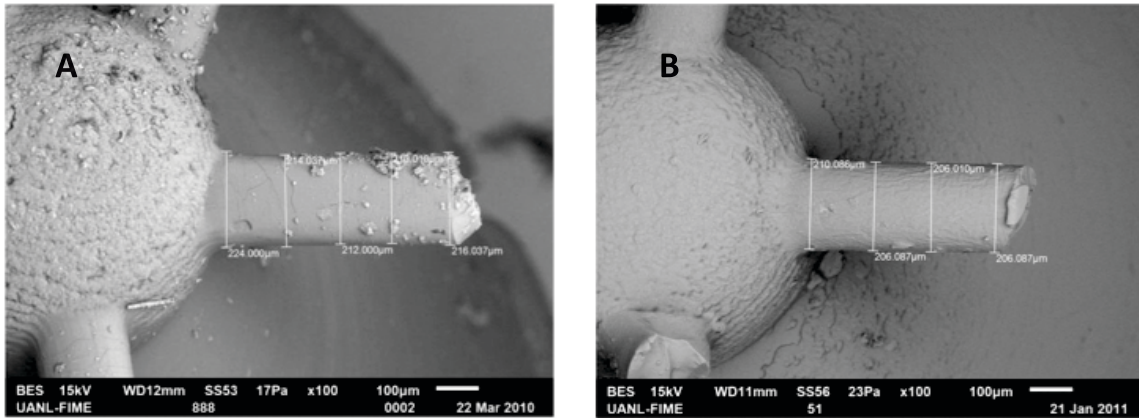


Figura 13. Dimensiones tobera nueva (A). Dimensiones tobera de 100.000 km (B).

(Gradeability) y capacidad de arranque (Startability) (Figura 14).

Los resultados de estas pruebas especiales muestran que el rendimiento entre los combustibles B5, B10 y B20 no presenta diferencias significativas. No hubo diferencias significativas en la capacidad de ascenso, independientemente de la mezcla a las distancias de 0-400 y 0-1.000 metros; la máxima capacidad de arranque fue de 28% a 2.600 m.s.n.m para las tres mezclas evaluadas.

En conclusión, las distintas mezclas no presentaron diferencias significativas en recuperación en plano y en pendiente, así como en la capacidad de arranque del vehículo.

Se realizó la evaluación del comportamiento de mezclas diésel-biodiésel en el chasis dinamométrico del Laboratorio de Motores del Instituto Colombiano

del Petróleo (ICP), mediante la ejecución de pruebas de determinación de rendimiento de combustible, emisiones de gases de escape y material particulado, así como pruebas de determinación de torque y potencia en el vehículo para pruebas especiales NKR III, proporcionado por GM-Colmotores. Estas pruebas se realizaron con el acompañamiento de Cenipalma y la auditoría de la Universidad de Antioquia.

Se realizaron ensayos preliminares en banco de rodillos, los cuales permitieron poner a punto y calibrar la instrumentación y equipos de medida así como depurar la metodología de medición adoptada en los ensayos finales. Las tendencias obtenidas mostraron que el material particulado (MP) y el monóxido de carbono (CO) disminuyó, mientras que los óxidos de nitrógeno (NOx) aumentaron con el contenido de biodiésel.

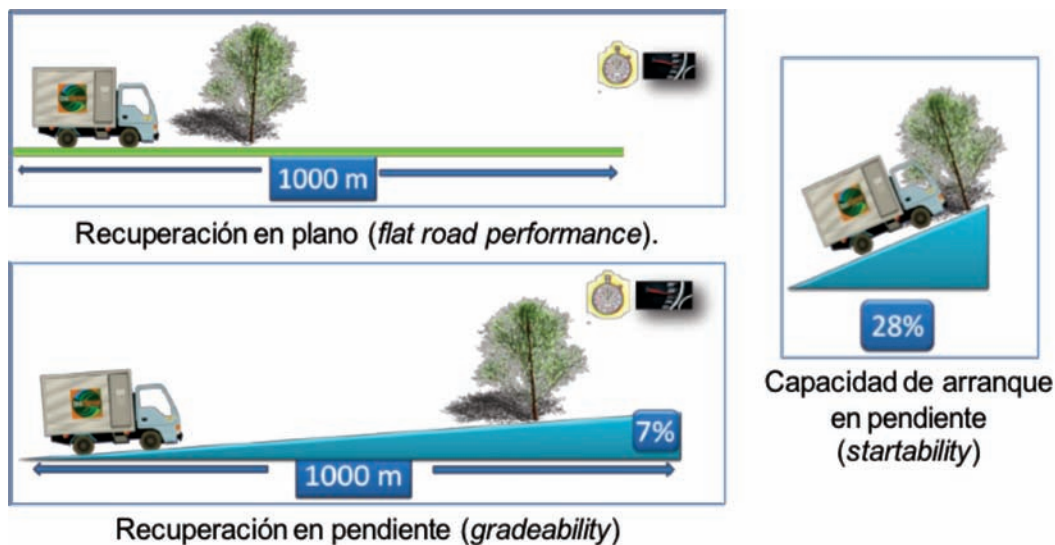
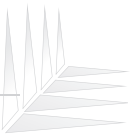


Figura 14. Pruebas especiales de desempeño.



De acuerdo con los resultados finales (Figura 15), la adición de biodiésel al diésel puro disminuyó las emisiones de hidrocarburos no quemados y de monóxido de carbono, al igual que las emisiones de NOx, excepto para la mezcla B20, que arrojó valores de emisión mayores que las que se obtuvieron al utilizar diésel (B0) y mezclas B5 y B10; en el caso del material particulado, se observó una tendencia a la disminución con el incremento del contenido de biodiésel en la mezcla y, en el caso del CO², se incrementa con el contenido de biodiésel debido a la combustión más completa.

Los resultados de las emisiones agrupados por mezcla simulados en el chasis dinamométrico durante las pruebas, mostraron un incremento en las emisiones de HC al disminuir la carga impuesta al vehículo funcionando con B20. Al utilizar el diésel (B0)

la carga al 50% y, del 5%, para la carga al 25%. Las emisiones de dióxido de carbono disminuyeron al reducir la carga. Para el material particulado se evidenció un incremento en las emisiones cuando la carga disminuyó, para las demás mezclas ocurrió lo contrario, se observó una disminución constante para los porcentajes de carga estudiados.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), variaron en función de la carga. Se produjo un incremento del 2% con B20 respecto al B5.

Las pruebas de torque y potencia mostraron que a plena carga (100%), la potencia disminuyó con mayor contenido de biodiésel en la mezcla respecto al combustible de referencia B0 en 2,45%, 6% y 6,5% para B5, B10 y B20, respectivamente. La pérdida de potencia con biodiésel respecto a B5 (4% con respecto a B20).

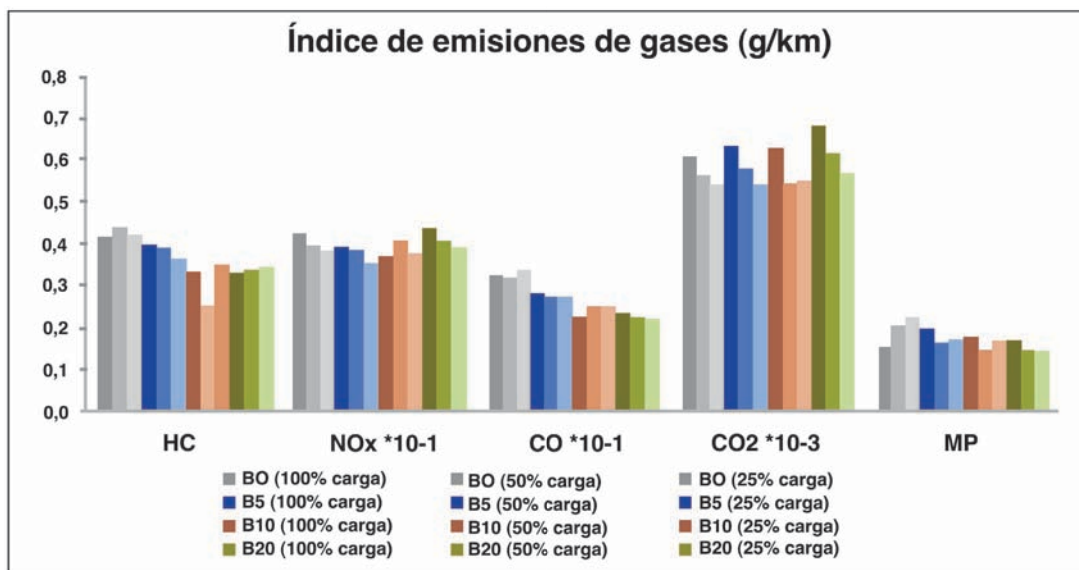


Figura 15. Índice de emisiones de HC, NOx, CO, CO₂ y MP.

se presentaron mayores emisiones con la carga al 50% y emisiones similares con la carga al 25%, respecto a las obtenidas con la carga total (100%). Para la mezcla B5, se disminuyeron las emisiones de HC a cargas del 50% y 25%. Con la mezcla B10 se obtuvieron menores emisiones con la carga al 50% y mayores con la carga al 25%, respecto a la carga total (100%).

Las emisiones de CO presentaron ligeros cambios respecto a la concentración de biodiésel en la mezcla y la carga impuesta durante el manejo del ciclo, el mayor cambio se produjo con B10, un incremento en las emisiones de aproximadamente 3% para

Conclusiones

Los parámetros de calidad de los combustibles puros y sus mezclas cumplieron con las normas establecidas por la legislación colombiana. Además, las buenas prácticas de manejo de los combustibles utilizados fueron fundamentales para el óptimo desempeño exhibido por las unidades de prueba durante el desarrollo del proyecto.

El rendimiento del combustible dado por las mezclas diésel-biodiésel de palma fue satisfactorio, manteniéndose dentro del rango promedio histórico de la operación de la flota de vehículos de Coordina-

dora Mercantil. Durante la prueba de larga duración, el índice de opacidad se mantuvo siempre por debajo del límite establecido por la autoridad ambiental para fuentes móviles diésel. La calidad del aceite lubricante no se vio afectada por el uso de las diferentes mezclas diésel-biodiésel de palma, razón por la cual se amplió a 8.000 kilómetros su frecuencia de cambio, con resultados satisfactorios.

Las videoscopías mostraron una apariencia normal de las partes internas del motor como cilindros, asientos y tapas de válvulas que se hallaron limpias y libres de residuos de combustión. El uso de las mezclas de combustible diésel-biodiésel de palma no influyó en los desgastes de las piezas del sistema combustible para los 100.000 km recorridos por cada vehículo.

Las mezclas de combustible no afectaron significativamente el desempeño en la recuperación en plano y en pendiente del vehículo de prueba, la capacidad de

arranque en pendiente no se vio afectada por los porcentajes de mezclas diésel-biodiésel de palma. Las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y material particulado disminuyeron al aumentar la concentración de biodiésel. Las emisiones de dióxido de carbono tuvieron un ligero aumento proporcional al porcentaje de biodiésel en la mezcla, debido a una mejor combustión. Los óxidos de nitrógeno variaron de acuerdo con la carga aplicada.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a otras entidades vinculadas a las pruebas: Ministerio de Minas y Energía, Universidad de Antioquia- Grupo del Manejo Eficiente de Energía, Coordinadora Mercantil, Shell Lubricantes, ExxonMobil. Y al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma.



Bibliografía

- Amado, M.; García, J.; Carranza, R.; Cuéllar, M.; Torres, J.; Acero, J.; Sarmiento, J. A.; Sarmiento, J. L.; Cabuya, D.; Rincón, O. 2008. Pruebas de larga duración con biodiésel de palma en una flota de servicio público en Bogotá. Palmas (Colombia). Vol. 29, N° 4.
- Ameer, S.; Gopal, K.; Jebaraj, S. 2009. *A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance*. En: *Renewable and Sustainable Energy Review*. Vol. 13, N° 6, p. 1628-1634.
- Atadashi, I. M.; Aroua, M. K.; Abdul Aziz, A. 2010. *High quality biodiesel and its diesel engine application: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 1999-2008.
- Cuéllar, M.; Torres, J. 2007. Posibilidades del biodiésel de palma y sus mezclas con diésel en Colombia. Palmas (Colombia). Vol. 28, N° Especial. Tomo 2.
- Cuéllar Sánchez, M. 2010. Impacto del programa de Biodiésel en el mercado de aceite de palma en Colombia. Palmas (Colombia) Vol. 31 N° 3: 27-34.
- Demirbas, A. 2009. *Progress and recent trends in biodiesel fuels*. *Energy Conversion and Management*. 50:14-34.
- Karavalakis, G.; Stournas, S.; Karonis, D. 2010. *Evaluation of the oxidation stability of diesel/biodiesel blends*. *Fuel* 89, 2483-2489.
- Kapilan, N.; Ashok Babu, T. P.; Reddy, R. P. 2009. *Technical aspects of biodiesel and its oxidation stability*. *International Journal of ChemTech Research*. Vol.1, No.2, pp 278-282.
- Knothe, G. 2010. *Biodiesel and renewable diesel: A comparison*. *Progress in Energy and Combustion Science*. 36: 364-373.
- Mesa, J. 2008. Biodiésel de Palma en Colombia: un sueño hecho realidad. En: Palmas (Colombia). Vol. 29, no. 2, p. 81-89.

51 AÑOS AL SERVICIO DE LA AGROINDUSTRIA DE LA PALMA EN LATINOAMÉRICA



Diseño, Fabricación y Montaje
de Plantas Extractoras de
Aceite de Palma



Bombas Centrifugas
Equipos para Esterilización Continua
Equipos para Plantas de Biodiésel
Tanques para Transformadores de Alta Potencia

Carrera 82B No 54A - 03 Sur
PBX: (57-1) 7841024 - FAX: (57-1) 7847035
CEL. 3153362134
email: consultecnica@consultecnica.com.co
www.consultecnica.com.co
Bogotá D.C. - Colombia

Semillas de Híbrido OxG Indupalma: Minimice su riesgo y obtenga un aceite de alta calidad



**Nuestra
marca
garantiza
su siembra**

- Mayor tolerancia a las plagas de la América tropical.
- Aceite de mejor calidad con un mayor porcentaje de grasas saludables.
- Mayor productividad en toneladas de fruto por hectárea.
- Más años de producción del cultivo.
- Frutos con más fácil manejo industrial para mayor eficiencia.

Contáctenos

Industrial Agraria La Palma Ltda.

Calle 67 No. 7 – 94, Piso 8 • Teléfono: (571) 347 0010 • Bogotá D.C., Colombia

Km. 10 Vía Panamericana • Teléfono: (575) 565 6969 • San Alberto (Cesar)

<http://www.indupalma.com>



INDUPALMA®
Negocios en la palma de su mano