



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# **EFFECTO DE LA UTILIZACIÓN DE BIODIESEL SOBRE LAS EMISIONES DE VEHÍCULOS PESADOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
PAZ ISABEL ARAYA JOFRÉ**

PROFESOR GUÍA  
MAURICIO OSSES ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
FRANCISCO GRACIA CAROCA  
ROBINSON BETANCOURT ASTETE

SANTIAGO DE CHILE  
ENERO 2009

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: PAZ ARAYA JOFRÉ  
FECHA:  
PROF. GUÍA: MAURICIO OSSES A.

“EFECTO DE LA UTILIZACIÓN DE BIODIESEL SOBRE LAS EMISIONES DE  
VEHÍCULOS PESADOS”

El biodiesel es un combustible preparado en base a aceites vegetales, grasas animales, o desperdicios de aceites los cuales se hacen reaccionar con metanol o etanol para convertir las grasas triglicéridos en metil o etil ésteres vía transesterificación. Las características de este combustible lo hacen apropiado para funcionar en motores de ignición por compresión.

En la actualidad el biodiesel se plantea como una alternativa o un complemento al diesel para los vehículos pesados, siendo entonces necesario establecer políticas para su producción y utilización en bases a los efectos que pueda tener en los vehículos. La presente investigación tiene como objetivo determinar el efecto de la utilización de distintas mezclas de biodiesel sobre las emisiones de vehículos pesados.

Para llevar a cabo la investigación se realizaron mediciones de los niveles de contaminantes críticos: hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO), material particulado (MP) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Estas se efectuaron sobre 2 tipos de camiones ( con norma y sin norma de emisiones); con 2 tipos de biodiesel (raps y aceite refrito) y 2 porcentajes de biodiesel en la mezcla (5%, y 10%). Los ensayos se realizaron siguiendo la fase rural y la fase urbana del ciclo transiente de conducción europeo FIGE-ETC, sobre un dinamómetro de chasis para vehículos pesados.

Para los dos camiones y los dos tipos de biodiesel, las emisiones de  $\text{NO}_x$  aumentaron entre 4% y 5%, para una mezcla al 10% de biodiesel, siendo este aumento mayor para el biodiesel de aceite refrito. Así mismo, en todos los casos el material particulado presentó reducciones entre un 20% y un 50%. CO presentó reducciones sólo para el camión con norma Euro II, mientras que para el camión sin norma no presentó tendencias definidas. Tanto  $\text{NO}_x$  como MP y CO se comportaron de forma similar a lo reportado en la literatura, mientras que HC ni  $\text{CO}_2$  mostraron tendencias de cambio en sus emisiones.

En conclusión, es posible utilizar una mezcla de diesel hasta con 10% de biodiesel, teniendo únicamente efectos negativos en las emisiones de  $\text{NO}_x$ , las cuales pueden ser tratadas modificando el tiempo de inyección; con efectos positivos en las emisiones de material particulado y en algunos casos en las emisiones de CO; y sin efectos importantes en el resto de los contaminantes.

## Tabla de contenido

---

Tabla de contenido.....	i
Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tablas.....	vi
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
Capítulo 2 Antecedentes.....	3
2.1 Mecanismos de formación de contaminantes.....	3
2.2 Propiedades del Biodiesel.....	5
2.3 Emisiones esperadas del Biodiesel.....	8
Capítulo 3 Metodología específica.....	13
3.1 Descripción de los ensayos.....	13
3.2 Metodología de análisis.....	16
Capítulo 4 Resultados obtenidos.....	18
4.1 Resultados de los ensayos en camión sin norma.....	18
4.2 Resultados de los ensayos en camión con norma.....	28
4.3 Resultados de los análisis a los combustibles.....	40
Capítulo 5 Discusión de los resultados.....	43
5.1 Discusión resultados de los ensayos.....	43

5.1.1	Análisis de las tendencias en las emisiones .....	43
5.1.2	Análisis estadístico de las emisiones.....	52
5.2	Efecto de las propiedades del biodiesel en las emisiones .....	54
5.2.1	Revisión literaria.....	54
Capítulo 6	Conclusiones .....	67
Capítulo 7	Bibliografía .....	70
Capítulo 8	ANEXOS .....	73
8.1	ANEXO A.....	73
8.1.1	Descripción del laboratorio.....	73
8.1.2	Método de Medición de Emisiones.....	77
8.2	ANEXO B.....	81
8.2.1	Ficha Técnica camión sin norma.....	81
8.2.2	Ficha técnica camión con norma.....	82
8.3	ANEXO C.....	83
8.3.1	Mediciones en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito .....	83
8.3.2	Mediciones en camión sin norma con biodiesel de raps .....	84
8.3.3	Mediciones en camión con norma con biodiesel de aceite refrito .....	85
8.3.4	Mediciones en camión con norma con biodiesel de raps .....	86

## Índice de Figuras

---

Fig. 2.1: Proporción de ácidos grasos en distintos biodiesel de distinta procedencia[3].	7
Fig. 2.2: Variaciones esperadas en emisiones a partir del porcentaje de biodiesel [1].	10
Fig. 3.1: Ciclo transiente europeo FIGE .....	14
Fig. 4.1 Emisiones de HC en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito.....	21
Fig. 4.2 Emisiones de NO <sub>x</sub> en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito.....	21
Fig. 4.3 Emisiones de CO en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito.....	22
Fig. 4.4 Emisiones de CO <sub>2</sub> en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito .....	23
Fig. 4.5 Emisiones de MP en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito .....	23
Fig. 4.6 Variaciones en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito .....	24
Fig. 4.7 Emisiones de HC en camión sin norma con biodiesel de raps .....	25
Fig. 4.8 Emisiones de NO <sub>x</sub> en camión sin norma con biodiesel de raps .....	25
Fig. 4.9 Emisiones de CO en camión sin norma con biodiesel de raps .....	26
Fig. 4.10 Emisiones de CO <sub>2</sub> en camión sin norma con biodiesel de raps .....	26
Fig. 4.11 Emisiones de MP en camión sin norma con biodiesel de raps .....	27
Fig. 4.12 Variaciones en camión sin norma con biodiesel de raps .....	28
Fig. 4.13 Emisiones de HC en camión con norma con biodiesel de aceite refrito.....	33

Fig. 4.14 Emisiones de NO <sub>x</sub> en camión con norma con biodiesel de aceite refrito .....	34
Fig. 4.15 Emisiones de CO en camión con norma con biodiesel de aceite refrito .....	34
Fig. 4.16 Emisiones de CO <sub>2</sub> en camión con norma con biodiesel de aceite refrito .....	35
Fig. 4.17 Emisiones de MP en camión con norma con biodiesel de aceite refrito .....	35
Fig. 4.18 Variaciones en camión con norma con biodiesel de aceite refrito .....	36
Fig. 4.19 Emisiones de HC en camión con norma con biodiesel de raps .....	37
Fig. 4.20 Emisiones de NO <sub>x</sub> en camión con norma con biodiesel de raps .....	37
Fig. 4.21 Emisiones de CO en camión con norma con biodiesel de raps .....	38
Fig. 4.22 Emisiones de CO <sub>2</sub> en camión con norma con biodiesel de raps .....	38
Fig. 4.23 Emisiones de MP en camión con norma con biodiesel de raps .....	39
Fig. 4.24 Variaciones en camión con norma con biodiesel de raps .....	40
Fig. 5.1 Tendencias en las emisiones de HC, Ciclo completo .....	43
Fig. 5.2 Tendencias en las emisiones de HC, fase 1 .....	44
Fig. 5.3 Tendencias en las emisiones de HC, fase 2 .....	44
Fig. 5.4 Tendencias en las emisiones de NO <sub>x</sub> , ciclo completo .....	45
Fig. 5.5 Tendencias en las emisiones de NO <sub>x</sub> , fase 1 .....	46
Fig. 5.6 Tendencias en las emisiones de NO <sub>x</sub> , fase 2 .....	46
Fig. 5.7 Tendencias en las emisiones de CO, ciclo completo .....	47
Fig. 5.8 Tendencias en las emisiones de CO, fase 1 .....	48
Fig. 5.9 Tendencias en las emisiones de CO, fase 2 .....	48

Fig. 5.10 Tendencias en las emisiones de CO <sub>2</sub> , ciclo completo.....	49
Fig. 5.11 Tendencias en las emisiones de CO <sub>2</sub> , fase 1.....	49
Fig. 5.12 Tendencias en las emisiones de CO <sub>2</sub> , fase 2.....	50
Fig. 5.13 Tendencias en las emisiones de MP, ciclo completo.....	50
Fig. 5.14 Tendencias en las emisiones de MP, fase 1.....	51
Fig. 5.15 Tendencias en las emisiones de MP, fase 2.....	51
Fig. 5.16 Emisiones de NO <sub>x</sub> para distintos tiempos de inyección [11].....	55
Fig. 5.17 Comienzo de la inyección en función del módulo volumétrico [13].....	56
Fig. 5.18 Emisiones de NO <sub>x</sub> en función de la densidad [7].....	56
Fig. 5.19 Emisiones de NO <sub>x</sub> en función del número de yodo [7].....	57
Fig. 5.20 Variación en las emisiones de NO <sub>x</sub> para biodiesel de distintas fuentes [1] ...	58
Fig. 5.21 Emisiones de material particulado en función del contenido de oxígeno [15]	59
Fig. 5.22 Emisiones de MP en función del número de yodo [7] .....	60
Fig. 5.23 Emisiones de MP para distintos largos de cadena de ácidos grasos [7] .....	60
Fig. 5.24 Variaciones en las emisiones de MP para biodiesel de distintas fuentes [1]..	61
Fig. 5.25 Emisiones de CO para distintos contenidos de oxígeno [11] .....	61
Fig. 5.26 Variaciones en las emisiones de CO para biodiesel de distintas fuentes [1]..	62
Fig. 5.27 Emisiones de HC para distintos contenidos de oxígeno [11] .....	63

## Índice de Tablas

---

Tabla 2.1: Propiedades del combustible diesel y biodiesel [9].....	5
Tabla 2.2: Efecto de las propiedades en las emisiones[6] .....	7
Tabla 2.3: coeficiente de correlación para cada contaminante[1].....	9
Tabla 4.1 Emisiones en camión sin norma con diesel comercial .....	18
Tabla 4.2 Emisiones en camión sin norma con mezcla de biodiesel de aceite refrito ...	19
Tabla 4.3 Emisiones en camión sin norma con mezcla de biodiesel de raps.....	19
Tabla 4.4 Variaciones en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito.....	20
Tabla 4.5 Variaciones en camión sin norma con biodiesel de raps .....	20
Tabla 4.6 Comparación de diesel comercial con rangos esperado .....	20
Tabla 4.7 Emisiones en camión con norma con diesel comercial .....	31
Tabla 4.8 Emisiones en camión con norma con mezcla de biodiesel de aceite refrito .	31
Tabla 4.9 Emisiones en camión con norma con mezcla de biodiesel de raps.....	31
Tabla 4.10 Variaciones en camión con norma con biodiesel de aceite refrito.....	32
Tabla 4.11 Variaciones en camión con norma con biodiesel de raps .....	32
Tabla 4.12 Comparación de diesel comercial con rangos esperado .....	32
Tabla 4.13 Propiedades del diesel comercial utilizado en camión sin norma.....	41



Tabla 4.14 Propiedades del diesel comercial utilizado en camión con norma .....	41
Tabla 4.15 Propiedades químicas de los dos tipos de biodiesel.....	41
Tabla 5.1 Resultados test de hipótesis para camión sin norma.....	52
Tabla 5.2 Resultados test de hipótesis para camión con norma.....	52
Tabla 5.3 Resultados test de hipótesis para camión sin norma.....	53
Tabla 5.4 Resultados test de hipótesis para camión con norma.....	53
Tabla 5.5 Resultados test de hipótesis para camión sin norma.....	53
Tabla 5.6 Resultados test de hipótesis para camión con norma.....	53



## Capítulo 1      **Introducción**

---

El biodiesel es un combustible preparado en base a aceites vegetales, grasas animales, o desperdicios de aceites los cuales se hacen reaccionar con metanol o etanol convirtiendo las grasas o triglicéridos en metil o etil esteres vía transesterificación. Las características de este combustible lo hacen apropiado para funcionar en motores de ignición por compresión, como una alternativa al diesel al ser utilizado puro o mezclado con diesel en distintas proporciones.

La presente investigación consiste en la medición experimental y análisis de las emisiones en camiones operando con mezcla de biodiesel y diesel.

### **1.1 Motivación**

La crisis que viven actualmente los combustibles convencionales, el alza de precios y principalmente la preocupación por la calidad del aire, han llevado a entidades públicas y privadas a plantear el uso del biodiesel como una real alternativa al ser mezclado con diesel en porcentajes bajos, menores al 20%.

Este aumento en el interés hacia el biodiesel lleva a la necesidad de estudiar los efectos que el uso de este combustible puede tener en las emisiones de un vehículo, de modo de evaluar de qué forma el uso de distintos porcentajes de biodiesel en un motor diesel afecta la cantidad emitida de cada uno de los contaminantes actualmente regulados.

El conocimiento de los efectos en las emisiones al utilizar biodiesel permitirá establecer políticas correctas que enmarquen la utilización de este biocombustible.

### 1.2 Objetivos

El objetivo principal de la siguiente investigación es determinar el efecto de la utilización de distintas mezclas de biodiesel sobre las emisiones de vehículos pesados para bajos porcentajes de biodiesel (0% al 20%) en una base de diesel convencional.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Realizar mediciones de los niveles de contaminantes en los gases de escape en camiones de diferentes características.
- Cuantificar la variación en las emisiones de hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO), material particulado (MP) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
- Determinar la relación entre las propiedades químicas de los combustibles ensayados y las emisiones asociadas.
- Establecer qué variaciones en las emisiones se deben a la utilización de biodiesel en el vehículo, y cuáles son las principales propiedades del combustible que influyen en este comportamiento.

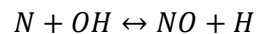
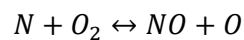
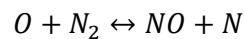
## Capítulo 2      Antecedentes

---

### 2.1 Mecanismos de formación de contaminantes

#### *Formación de NO<sub>x</sub>*

El término NO<sub>x</sub> se utiliza para referirse a los óxidos de nitrógeno, conjunto formado principalmente por los NO y los NO<sub>2</sub>. Los NO, que constituyen la mayor parte de los NO<sub>x</sub>, se forman a partir de nitrógeno atmosférico mediante el llamado mecanismo de Zeldovich, siendo las principales reacciones que lo gobiernan las siguientes:



La formación de NO ocurre principalmente tras la llama y depende fuertemente de la temperatura y de la concentración de oxígeno, de modo que a mayor temperatura y cantidad de oxígeno mayor es la generación de NO.

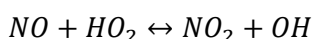
En un motor operando con diesel la mayor parte del NO se forma en los 20° de ángulo de la biela siguientes al inicio de la combustión. Al retrasar la inyección, se retarda también la combustión y subsecuentemente la formación de NO, luego las concentraciones de NO alcanzadas son menores debido a que los peaks de temperatura alcanzados son menores. De la misma forma al adelantar la inyección aumenta la formación de NO.

La dependencia de la formación de NO con la temperatura se debe a razones físicas del proceso de combustión. Una vez formado el NO tras la llama, la alta temperatura de los gases quemados no permite que reacciones químicas que involucren átomos de N y O alcancen equilibrio químico, luego, mientras los gases quemados se enfrían durante la

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

expansión, las reacciones que involucran al NO se detienen, evitando de esta forma su destrucción, la que si hubiese ocurrido en condiciones de equilibrio.

En motores diesel el NO<sub>2</sub> constituye cerca del 30% de los NO<sub>x</sub>, esto se debe a que el NO formado puede ser rápidamente convertido en NO<sub>2</sub> por medio de las siguientes reacciones:



Este NO<sub>2</sub> puede volver a convertirse en NO si se mezclan los gases con un fluido más frío, es por esto que se produce en motores diesel a baja carga, cuando existen zonas frías que inhiben la reconversión.

### ***Formación de MP***

El material particulado está compuesto de hollín (material carbonáceo) el cual adsorbe varios compuestos orgánicos (hidrocarburos, derivados de oxigenados, PAH). Las partículas de hollín se producen principalmente del carbón contenido en el combustible, generándose en llamas de difusión entre los 2000 y 2400 K.

El hollín formado es luego oxidado, después de la mezcla en zonas ricas de oxígeno. En efecto, la presencia de oxígeno puede convertir el hollín o sus precursores en compuestos gaseosos tales como CO y CO<sub>2</sub>. Luego, la emisión de de hollín depende del balance entre las reacciones de formación y oxidación.

Otra fuente para la formación de material particulado es el contenido de azufre. El azufre presente en la molécula de combustible se oxida durante la combustión formando SO<sub>2</sub>, el cual es en parte oxidado formando a su vez SO<sub>4</sub>. El SO<sub>4</sub> asociado con agua forma el núcleo de carbón del material particulado.

### ***Formación de CO***

El monóxido de carbono se genera a partir de la combustión incompleta del diesel, es decir es un producto intermedio del proceso de combustión. Es por esto que sus emisiones dependen considerablemente de la relación aire/combustible al interior de la cámara de

combustión, y por lo tanto para un motor diesel, que opera con mezcla pobre, las emisiones de CO son más bajas que las de otros motores.

**Formación de HC**

Los HC corresponden a los hidrocarburos no quemados durante el proceso de combustión, es decir se generan a partir de la quema incompleta del combustible. En los motores diesel el HC se puede formar por medio de dos mecanismos, tanto en mezclas excesivamente pobres como en mezclas excesivamente ricas.

En las mezclas muy pobres se tiene que el combustible en los límites externos de la zona de inyección sobrepasan los límites inferiores de inflamabilidad y no puede mantener el frente de llama. La cantidad de HC originado en esta área dependerá de la cantidad de combustible inyectada durante el retraso en la combustión, la tasa de mezcla con el aire y las condiciones de auto inflamación, por lo cual existe una correlación entre el número de cetano y las emisiones de HC.

En las mezclas muy ricas la formación de HC puede deberse en parte a una mezcla deficiente con el aire a raíz de una lenta entrada del combustible; o bien a un exceso de combustible el cual puede invadir la cámara de combustión.

**2.2 Propiedades del biodiesel**

Los distintos efectos que el biodiesel pueda tener en el motor y sus emisiones, con respecto a un combustible diesel, dependen de las distintas propiedades que presenten. Las principales propiedades se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 2.1: Propiedades del combustible diesel y biodiesel [9]**

<b>Propiedad del combustible</b>	<b>Diesel</b>	<b>Biodiesel</b>
Número de cetano	40 a 55	47 a 65
Densidad, kg/l @15°C	0,84	0,89
Viscosidad Cinemática, ~40°C	1,3 - 4,1	1,9 - 6,0
T90, °F	603	666
Azufre, % peso	0,05 máx.	0,0024 máx.
Oxígeno, dif. % peso	0	11
Poder Calorífico Inferior, Btu/gal	~129,050	~118,170

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

Agua y sedimentos, vol%	0,05 máx.	0,05 máx.
Carbón, w% peso	0,2	0,05
Aromáticos, vol %	34	0
Punto de Ebullición, °C	180 a 340	315 a 350
Temperatura de desprendimiento, °C	60 a 80	93 a 170
Punto de Turbiedad, °C	-15 a 5	-3 a 12
Punto de congelamiento, °C	-35 a -15	-15 a 10
Lubricidad SLBOCLE, gramos	2000 - 5000	>7000

El número de cetano es una medida de la calidad de ignición del combustible, de modo a que a mayor número de cetano el combustible se inflama con mayor facilidad. Un número de cetano alto permite mejorar las condiciones del motor de encendido en frío.

La viscosidad es una propiedad importante que impacta el desempeño de los sistemas de inyección. Si la viscosidad es muy baja algunas bombas de inyección pueden experimentar excesivo desgaste y pérdida de potencia. Si la viscosidad es muy alta, puede causar mucha resistencia al bombeo dañando filtros y atomizadores. Además una viscosidad alta puede causar una combustión pobre que conduce a la formación de depósitos. El biodiesel, según se observa, presenta una alta viscosidad en relación al combustible diesel.

La volatilidad es medida por medio del ensayo de punto de destilación, principalmente el T90 correspondiente la temperatura donde el 90% del combustible se ha evaporado.

El contenido de azufre afecta principalmente las emisiones de material particulado de sulfato y  $SO_x$  en los vehículos sin tratamientos de gases de escape y tiene un impacto en los artefactos para el control de emisiones, principalmente en sistemas de recirculación de gases de escape, EGR. Reducir el azufre de un 0,3% a un 0,05% puede dar importantes beneficios en la reducción de material particulado, pues se reduce la fracción de  $SO_x$  del MP, disminuyendo así la masa total, sin embargo reducir azufre bajo el 0,05% tiene beneficios mínimos. El biodiesel presenta una importante reducción en el contenido de azufre con respecto al diesel convencional, incluso para las normas más estrictas.

La siguiente tabla muestra un resumen de cómo los cambios en las propiedades del combustible afectan a las emisiones en vehículos pesados:



Tabla 2.2: Efecto de las propiedades en las emisiones[6]

Modificación al combustible	HC	CO	NOx	MP
Reducir Azufre *	0	0	0	↓↓↓ b
Aumentar Número de cetano	↓↓↓ a	↓↓↓ a	↓	0
Reducir Aromáticos	0	0	↓	0
Reducir densidad	↑↑	↑	↓	↓↓↓ a
Reducir Poli aromáticos	↓	0	↓	↓↓↓ a
Reducir T90/T91	↑	↑	↓	0

- Leyenda -
- 0 Sin efecto
  - ↑/↓ Efecto muy leve
  - ↑/↓ Efecto leve
  - ↑↑/↓↓ Efecto importante
- a El efecto se hace presente sólo en motores de altas emisiones
- b Reducir el azufre bajo un 0,05% no tiene efectos notorios

Las características del biodiesel pueden variar según su procedencia, es decir, las propiedades mencionadas en la Tabla 2.1 corresponden a rangos o promedios, siendo los valores exactos distintos según sean distintos los productos a partir de los cuales se produjo el biodiesel (soya, raps, animal, aceite reutilizado). Lo que hace que las características varíen es que distintos tipos de biodiesel tienen diferentes proporciones de ácidos grasos saturados (sin enlaces dobles), monoinsaturados (un enlace doble) y poliinsaturados (varios enlaces dobles) y distintos tamaños de las cadenas de ácidos grasos. Las proporciones de ácidos grasos para distintos tipos de biodiesel se presentan en la siguiente figura.

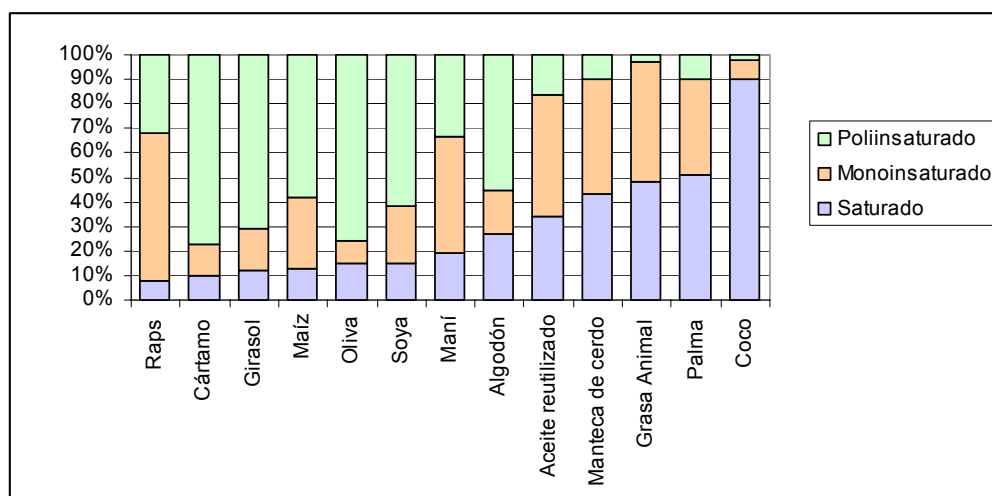


Fig. 2.1: Proporción de ácidos grasos en distintos biodiesel de distinta procedencia[3]

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

El impacto de la estructura molecular se da principalmente sobre el número de cetano y la densidad. Los ésteres más saturados tienen un mayor número de cetano y menos densidad que los menos saturados. El índice de yodo es una medida del grado de insaturación o número de enlaces dobles. Por otra parte, al disminuir el largo de la cadena de ácidos grasos o el peso molecular disminuirá la viscosidad y el punto de ebullición.

El biodiesel debe además cumplir con requisitos que no son solicitados en el caso del diesel, estos requisitos específicos dan cuenta de la calidad del proceso de transesterificación.

La viscosidad y la densidad son medidas indirectas de la eficiencia de la transformación de los mono, di y triglicéridos en metilésteres. Los aceites que se utilizan para la producción de biodiesel poseen densidades del orden de 0,92 a 0,94 g/mL con viscosidades entre 33 y 37 mm<sup>2</sup>/s; el objetivo de la transesterificación es actuar sobre estas y otras propiedades. El aceite mejora así sus propiedades como combustible líquido. Una viscosidad alta, en comparación a las normas existentes para el biodiesel, presume un proceso de transesterificación insuficiente.

El contenido de metanol, si bien favorece el desplazamiento de la reacción hacia la formación de ésteres, reduce la calidad del producto y compromete a un mayor esfuerzo en retirar este excedente. En general, el metanol debe ser recuperado después de la reacción, y su presencia en elevadas concentraciones puede acusar una separación ineficiente y/o una transesterificación con exceso desmedido de alcohol.

Finalmente, un contenido de ésteres totales y metilésteres de ácido linolénico bajo acusa un proceso de transesterificación ineficiente. Una mejora en este aspecto además favorece a reducir la viscosidad del producto.

### **2.3 Emisiones esperadas del biodiesel**

Un documento de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) [1] recolectó 39 artículos hasta el año 2001, que reportaban ensayos realizados a distintas mezclas de biodiesel, restringiendo el estudio únicamente a vehículos pesados sin sistema de recirculación de gases EGR y sin tratamientos posteriores a los gases de escape. Se logró caracterizar el comportamiento de las emisiones de los principales

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

contaminantes con un nivel de confianza de un 95%. Esta información ha sido ampliamente utilizada para otros estudios de emisiones en vehículos pesados con biodiesel. El estudio estimó para cada contaminante una correlación entre la variación de porcentaje de biodiesel y la variación en la cantidad de contaminante emitido. Esta correlación sigue en todos los casos la forma:

$$\%cambio\ en\ emisiones = \{\exp[a \times (\% vol\ BD)] - 1\} \times 100$$

Donde  $a$  corresponde a un coeficiente de correlación característico para cada contaminante considerado. Los valores de  $a$  para cada uno de los contaminantes considerados se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 2.3: coeficiente de correlación para cada contaminante[1]**

<b>Contaminante</b>	<b>Coficiente a</b>
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,0009794
<b>MP</b>	-0,006384
<b>HC</b>	-0,011195
<b>CO</b>	-0,006561

En el siguiente gráfico se presentan los resultados generales de contaminantes criterio, estableciendo el cambio en sus emisiones a medida que aumenta el porcentaje de biodiesel de la mezcla.

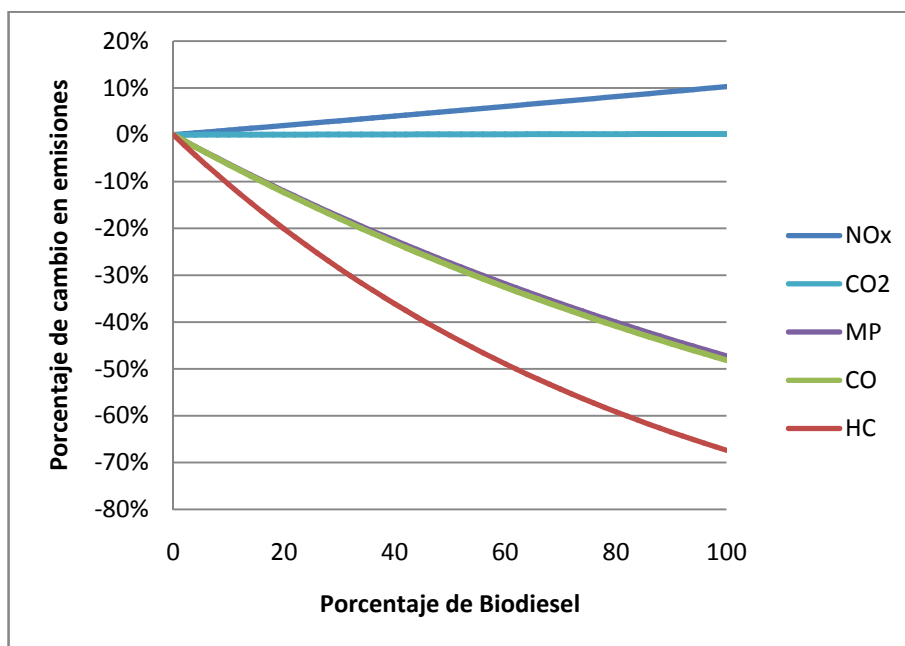


Fig. 2.2: Variaciones esperadas en emisiones a partir del porcentaje de biodiesel [1]

Estos valores están determinados a modo de promedio de todos los estudios considerados, y pueden variar según varíe el ciclo considerado, el año del modelo vehicular, la materia prima del biodiesel (soya, raps, animal) o el número de cetano. Sin embargo el comportamiento de las emisiones se espera que sea el mismo cualquiera sean las propiedades del biodiesel utilizado.

La reducción más importante corresponde al HC. Esta se puede explicar por el contenido de oxígeno en la molécula de biodiesel, el cual conduce a una combustión más limpia y completa. Además, el mayor número de cetano que presentan los distintos biodiesel puede reducir el retraso en la combustión y con esto, como se explicó antes, reducir las emisiones de HC. Por otro lado se tiene que la procedencia del biodiesel no afecta el comportamiento en las emisiones de HC, es decir, esta reducción se espera cualquiera sea el producto que origina el biodiesel.

Se reducen también las emisiones de CO, esta reducción se puede explicar por distintas razones. Nuevamente el contenido adicional de oxígeno en el biodiesel, el cual permite una mejor combustión, es uno de los motivos más reiterados para explicar este comportamiento. Así mismo se explica el comportamiento por el mayor número de cetano, el cual permite que disminuya la probabilidad de que se formen zonas ricas en combustible, las cuales

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

usualmente se asocian a la formación de CO. Esta reducción en las emisiones de CO es más importante si el biodiesel proviene de grasa animal que si proviene de raps, y más aún que si proviene de soya. Esto es un indicador que las emisiones de CO son menores a medida que el nivel de saturación del biodiesel es mayor.

Las emisiones de material particulado también presentan reducciones, similares a las que presenta el CO. La principal explicación para esto corresponde al mayor contenido de oxígeno en la molécula de biodiesel, el cual permite una combustión más completa incluso en regiones de la cámara de combustión con llamas de difusión ricas en combustible, y promueve la oxidación de hollín formado. Además el menor contenido de azufre, otro precursor del material particulado, puede ser una importante explicación para las menores emisiones de MP. Estas emisiones pueden variar según la procedencia del biodiesel, siendo mayores para el biodiesel de soya y menores para el biodiesel de grasa animal.

La curva de emisiones de CO<sub>2</sub> presentada corresponde a las emisiones de biodiesel de procedencia vegetal, la cual presenta un aumento prácticamente imperceptible. En el caso de biodiesel de procedencia animal se espera tener reducciones en sus emisiones de CO<sub>2</sub>. Si bien el menor contenido de carbón que tiene el biodiesel podría inferir en una menor emisión de CO<sub>2</sub>, lo cierto es que el biodiesel tiene también una menor cantidad de energía por litro, y en efecto, si se mide el contenido de carbón por unidad energética, este valor resulta ser mayor para el biodiesel lo que puede explicar su leve aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El NO<sub>x</sub> es el único contaminante que presenta un aumento claro en sus emisiones, y siendo, por lo tanto, el más estudiado. Al igual que en otros casos, las emisiones son mayores en el caso del biodiesel procedente de soya y menores en el caso del biodiesel de procedencia animal. Esto se debe a que las emisiones de NO<sub>x</sub> aumentan a medida que disminuye el tamaño de la cadena de carbón y aumenta la insaturación. Las explicaciones para este comportamiento aún no encuentran un consenso, si bien es sabido que la base de este se encuentra en la química del combustible, hay más de un factor que contribuye al efecto del biodiesel en los NO<sub>x</sub>. Además, el factor dominante puede cambiar según cambie la velocidad y carga del motor o con parámetros de diseño del mismo. Sin embargo la causa más aceptada es que la mayor densidad, velocidad del sonido y módulo volumétrico del biodiesel causan un avance en el encendido del tiempo de inyección.

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

Como se hizo mención anteriormente, los valores dados para la correlación entre el porcentaje de biodiesel utilizado y la variación en las emisiones, corresponde a un promedio entre todos los tipos de biodiesel. Esta correlación cambia al considerar únicamente el biodiesel de raps, correspondiente al biodiesel con un mayor desarrollo en Chile en la actualidad. Para el raps las correlaciones correspondientes a cada contaminante serán las siguientes [1].

$$\% \text{cambio en } NO_x = \{ \exp[(0,0010375 - 0,0002732) \times (\% \text{ vol } BD)] - 1 \} \times 100$$

$$\% \text{cambio en } MP = \{ \exp[(-0,0047395) \times (\% \text{ vol } BD)] - 1 \} \times 100$$

$$\% \text{cambio en } HC = \{ \exp[(-0,0118443) \times (\% \text{ vol } BD)] - 1 \} \times 100$$

$$\% \text{cambio en } CO = \{ \exp[(-0,0058238 + 0,0017335) \times (\% \text{ vol } BD)] - 1 \} \times 100$$

Luego, los valores de las emisiones, para cada uno de los contaminantes considerados, para una mezcla al 20% de biodiesel de raps y 80% de diesel convencional se presentan en la siguiente tabla:

Contaminante	Comportamiento esperado	Variación para B20 de raps	Causas Posibles
NOX	Aumento	+ 1,5%	Mayor viscosidad y número de cetano (mayor índice de yodo)
MP	Reducción	-23,7%	Oxígeno presente en biodiesel, menor formación de hollín.
HC	Reducción	-8,2 %	Oxígeno presente en biodiesel
CO	Reducción	- 9,5%	Oxígeno presente en biodiesel
CO2	Aumento leve	+0,035%	Mayor contenido de carbón por unidad de energía

## Capítulo 3 Metodología específica.

---

Para determinar las emisiones asociadas al uso de biodiesel en vehículos pesados se desarrollaron mediciones experimentales en buses y camiones operando con biodiesel. Los resultados de estas mediciones fueron analizados y comparados con la literatura de modo de determinar cuál es el efecto que tiene el biodiesel sobre las emisiones en los vehículos y las causas donde radican estos efectos.

### 3.1 Descripción de los ensayos

Los ensayos se realizaron en un laboratorio equipado dinamómetro de chasis donde se prueban los vehículos sometidos a ciclos de conducción y recolectando los gases de escape a través de una sonda que los conduce a un túnel de dilución, donde son mezclados con el aire ambiente previamente filtrado de modo de obtener una muestra diluida. A partir de la muestra se obtiene en cada ensayo la concentración de los distintos contaminantes emitidos. Para esto se contó con el laboratorio de vehículos pesados del Centro de Control y Certificación Vehicular, 3CV. Una descripción detallada del laboratorio, su equipamiento y los métodos de medición de cada contaminante se encuentra en el ANEXO A.

Los ensayos se realizaron en distintas instancias, en cada caso se variaron las características del vehículo, el tipo de biodiesel utilizado y la concentración de biodiesel sobre la base de diesel convencional. Además se utilizaron distintas fases del ciclo transiente de conducción europeo denominado “FIGE-ETC” para dinamómetro de chasis. Este ciclo completo consta de 3 fases:

- La fase 1 representa una situación de conducción en la ciudad, la velocidad máxima es de 50 km/hr y contiene partidas, detenciones y ralenti de manera frecuente.
- La fase 2 corresponde a una situación de conducción por un camino rural con una abrupta aceleración. La velocidad promedio es de 72 km/hr.

### CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA.

- La fase 3 representa una situación de conducción en autopista con una velocidad promedio de 88 km/hr.

El ciclo completo y sus tres fases se muestran en la siguiente figura:

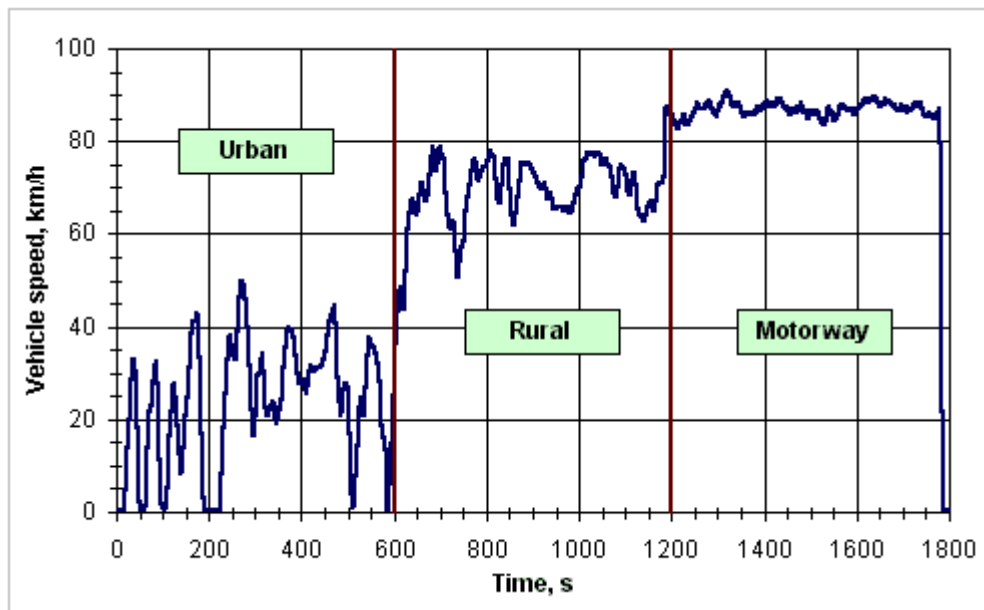


Fig. 3.1: Ciclo transiente europeo FIGE

En cada ensayo el ciclo a seguir correspondió a las dos primeras fases, fase urbana y fase rural.

Se ensayaron dos camiones, de modo de obtener resultados para dos tipos de tecnologías:

- Camión sin norma de emisión, Mercedes Benz 1419 del año 1983.
- Camión con norma Euro II, Iveco 150 E 27 R, del año 1996.

En la siguiente tabla se presentan las normas de emisiones para un vehículo pesado con Euro II.

	CO	HC	NO <sub>x</sub>	MP
Norma Emisiones	4,0	1,1	7,0	0,15



### CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA.

Un detalle de la información de los camiones se presenta en el ANEXO B. Para cada camión se ensayaron combustibles de dos fuentes en una base de diesel convencional comercial, para cada uno de los dos camiones se utilizaron dos muestras de combustible diesel, adquiridas en distintos momentos. Los tipos de biodiesel que se mezclaron con esos combustibles diesel fueron.

- Biodiesel de raps nacional
- Biodiesel de aceite refrito

Para cada caso se ensayaron tres mezclas:

- 100% diesel comercial
- 5% biodiesel (B5) + 95% diesel comercial
- 10% biodiesel (B10) + 90% diesel comercial

Se tienen ensayos en dos tipos de camiones, con dos tipos de combustibles cada uno y con dos tipos de mezcla en cada caso. Dado que cada ensayo se repite un total de 4 veces se tiene finalmente un total de 40 ensayos.

Además se analizarán los combustibles utilizados con el fin de conocer sus principales propiedades y poder inferir la relación entre estas y las emisiones asociadas al combustible. Para los combustibles diesel a utilizar se analizó:

- Densidad
- Contenido de azufre
- Destilación al 90%
- Índice de cetano
- Punto de Inflamación
- Viscosidad al 40%

Para las muestras de biodiesel se analizaron:

- Contenido de esteres
- Densidad
- Viscosidad cinemática

- Contenido de agua
- Contenido en metanol
- Índice de yodo
- Valor de acidez
- Contenido de metilesteres de ácido linoleico y poliinsaturados
- Contenido de azufre
- Índice de cetano

### 3.2 Metodología de análisis

A partir de los datos de las mediciones de emisiones de contaminantes se calcularon las variaciones porcentuales en las emisiones de cada contaminante de los vehículos operando con biodiesel con respecto a las emisiones en los vehículos con diesel. Los resultados obtenidos fueron graficados con el fin de comparar las emisiones según varios parámetros: origen del biodiesel, tipo de camión, porcentaje de biodiesel en la mezcla y fase del ciclo. Esta información fue a la vez comparada con la literatura, de forma específica con las emisiones esperadas según las correlaciones calculadas por la EPA en su estudio.

Se realizó luego un test de hipótesis, con el objetivo de contrastar las siguientes hipótesis:

- No hay variaciones en las emisiones de un contaminante específico al utilizar biodiesel de ciertas características.
- Existen variaciones (aumento o reducción) en las emisiones de un contaminante específico al utilizar biodiesel de ciertas características.

Se utilizó el estadístico t student, debido a lo pequeño del tamaño de la muestra, cuyos parámetros se calculan a partir de las siguientes relaciones:

$$t = \frac{\bar{X}_{diesel} - \bar{X}_{biodiesel}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n_{diesel}} + \frac{1}{n_{biodiesel}}}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_{diesel} \cdot S_{diesel}^2 + n_{biodiesel} \cdot S_{biodiesel}^2}{n_{diesel} + n_{biodiesel} - 2}}$$

### CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA.

Luego, si el estadístico se encuentra dentro del intervalo de confianza al 95% se concluye que las emisiones se reducen, si se encuentra en el lado opuesto se concluye que las emisiones aumentan y, si se encuentra fuera del intervalo de confianza, entonces se concluye que no hay cambios en las emisiones. Esto determinará las tendencias a concluir en el estudio.

Finalmente se realizó una revisión literaria con el fin de establecer las causas de las variaciones que se han determinado, y comparar las propiedades de los combustibles ensayados con las propiedades que, según la literatura, explicarían estas variaciones.

## Capítulo 4 Resultados obtenidos

---

### 4.1 Resultados de los ensayos en camión sin norma

Se presenta un resumen de los valores de emisiones del ensayo realizado en camión sin norma de emisiones operando con diesel comercial, con biodiesel de aceite refrito y con biodiesel de raps nacional. Para cada fase y para el ciclo total se presentan los valores promedio de las 4 repeticiones y la desviación estándar correspondiente. Un mayor detalle de estos resultados se presenta en el ANEXO B.

Tabla 4.1 Emisiones en camión sin norma con diesel comercial

		Diesel Comercial		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,55	0,67	0,89
	Desv. Est.	0,07	0,04	0,04
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	8,19	6,18	6,69
	Desv. Est.	0,08	0,10	0,06
CO [gr/km]	Prom Ciclo	5,08	4,04	4,31
	Desv. Est.	0,11	0,10	0,07
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	786	576	630
	Desv. Est.	4,72	3,98	4,27
MP [gr/km]	Prom Ciclo	0,84	0,70	0,73
	Desv. Est.	0,05	0,03	0,03

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

**Tabla 4.2 Emisiones en camión sin norma con mezcla de biodiesel de aceite refrito**

		Biodiesel Refrito 5%			Biodiesel Refrito 10%		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,82	0,72	1,00	1,95	0,79	1,10
	Desv. Est.	0,12	0,01	0,03	0,12	0,06	0,06
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	8,63	6,38	6,95	8,57	6,42	6,98
	Desv. Est.	0,31	0,05	0,10	0,35	0,02	0,10
CO [gr/km]	Prom Ciclo	5,75	4,06	4,49	5,57	4,25	4,59
	Desv. Est.	0,52	0,49	0,40	0,15	0,19	0,14
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	841	577	645	848	588	656
	Desv. Est.	33,99	5,89	10,52	36,93	1,47	9,88
MP [gr/km]	Prom Ciclo	0,76	0,64	0,67	0,77	0,65	0,68
	Desv. Est.	0,08	0,04	0,03	0,06	0,04	0,01

**Tabla 4.3 Emisiones en camión sin norma con mezcla de biodiesel de raps**

		Biodiesel Raps 5%			Biodiesel Raps 10%		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,45	0,61	0,82	1,64	0,67	0,92
	Desv. Est.	0,06	0,02	0,02	0,13	0,01	0,03
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	8,58	6,38	6,95	8,75	6,33	6,96
	Desv. Est.	0,26	0,06	0,07	0,10	0,10	0,10
CO [gr/km]	Prom Ciclo	5,05	3,78	4,10	5,08	3,65	4,02
	Desv. Est.	0,17	0,21	0,13	0,16	0,26	0,23
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	824	565	631	831	563	632
	Desv. Est.	31,32	8,11	7,30	7,20	6,11	6,23
MP [gr/km]	Prom Ciclo	0,69	0,59	0,62	0,70	0,53	0,57
	Desv. Est.	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01

A modo de determinar la variación en las emisiones para las dos clases de biodiesel, con respecto a las emisiones del diesel comercial, se presenta el siguiente cuadro comparativo. Los valores positivos corresponden a aumentos y se presentan con una flecha roja cuando son mayores al 10%, los valores negativos corresponden a reducciones y se presentan con una flecha verde cuando son mayores al 10%.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

**Tabla 4.4 Variaciones en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito**

	MEZCLA 5% REFRITO			MEZCLA 10 % REFRITO		
	Fase 1	Fase 2	Ciclo	Fase 1	Fase 2	Ciclo
<b>HC</b>	↓ 17,8%	↘ 7,9%	↓ 12,2%	↓ 25,7%	↓ 19,4%	↓ 22,8%
<b>NO<sub>x</sub></b>	↘ 5,3%	↘ 3,2%	↘ 3,9%	↘ 4,6%	↘ 4,0%	↘ 4,3%
<b>CO</b>	↓ 13,3%	↘ 0,5%	↘ 4,4%	↘ 9,7%	↘ 5,1%	↘ 6,7%
<b>CO<sub>2</sub></b>	↘ 7,0%	↘ 0,2%	↘ 2,4%	↘ 8,0%	↘ 2,1%	↘ 4,1%
<b>MP</b>	↗ -9,7%	↗ -8,0%	↗ -8,6%	↗ -8,1%	↗ -7,4%	↗ -7,5%

**Tabla 4.5 Variaciones en camión sin norma con biodiesel de raps**

	MEZCLA 5% RAPS			MEZCLA 10 % RAPS		
	Fase 1	Fase 2	Ciclo	Fase 1	Fase 2	Ciclo
<b>HC</b>	↗ -6,2%	↗ -8,4%	↗ -7,7%	↘ 6,0%	↘ 1,1%	↘ 3,3%
<b>NO<sub>x</sub></b>	↘ 4,8%	↘ 3,4%	↘ 3,8%	↘ 6,8%	↘ 2,5%	↘ 3,9%
<b>CO</b>	↗ -0,4%	↗ -6,5%	↗ -4,7%	↗ 0,0%	↗ -9,6%	↗ -6,6%
<b>CO<sub>2</sub></b>	↘ 4,9%	↗ -1,9%	↘ 0,2%	↘ 5,7%	↗ -2,3%	↘ 0,3%
<b>MP</b>	↑ -17,8%	↑ -15,5%	↑ -16,2%	↑ -16,6%	↑ -24,3%	↑ -22,1%

Además, con el fin de determinar posibles problemas en el camión ensayado, se comparan las emisiones del vehículo operando con diesel comercial, con un rango de valores esperado a partir de otras fuentes.

**Tabla 4.6 Comparación de diesel comercial con rangos esperado**

	Rango Esperado	Valor Experimental
<b>HC</b>	2 - 3	1,5
<b>NO<sub>x</sub></b>	5 - 12	8,2
<b>CO</b>	5 - 8	5,1
<b>MP</b>	0,5 - 1	0,78

Es posible corroborar que el camión se encontraba en buenas condiciones, dado que los valores de las emisiones obtenidos en los ensayos estuvieron siempre dentro o muy cerca del rango esperado acorde a ensayos anteriores en camiones de similares características.

Al graficar las emisiones promedio de distintos contaminantes, tanto para el diesel comercial como para el biodiesel de aceite refrito, se obtienen las siguientes figuras. En cada barra la línea corresponde a la desviación estándar.

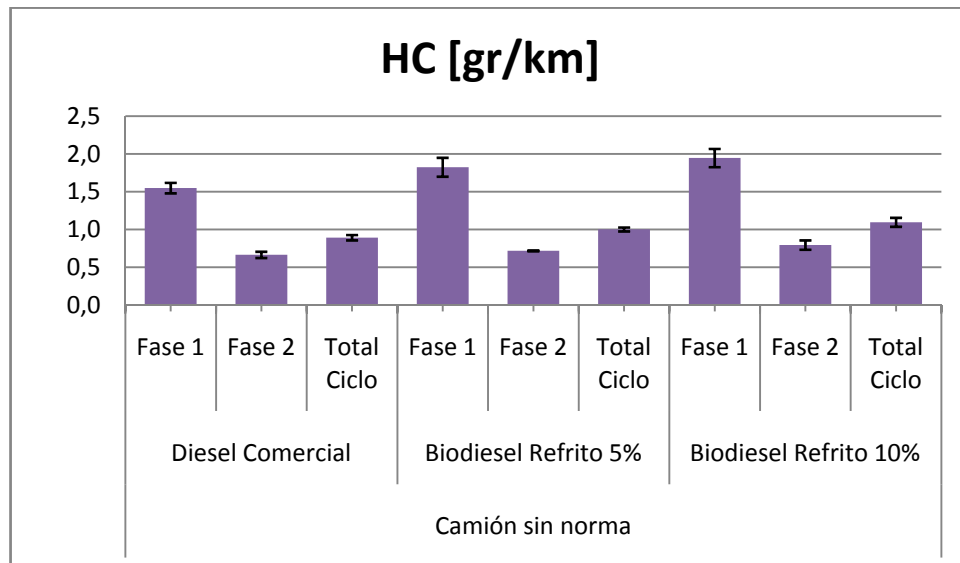


Fig. 4.1 Emisiones de HC en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito

Las emisiones de HC presentan un aumento para la fase 1, que es mayor al aumentar el porcentaje de biodiesel, mientras que la fase 2 presenta un aumento muy leve al utilizar un 10% de biodiesel, luego el ciclo total tiene un leve aumento en las emisiones de HC tanto al utilizar un 5% como un 10% de biodiesel. Se observa además que la desviación estándar en la fase 1 presenta valores altos en las 3 mezclas.

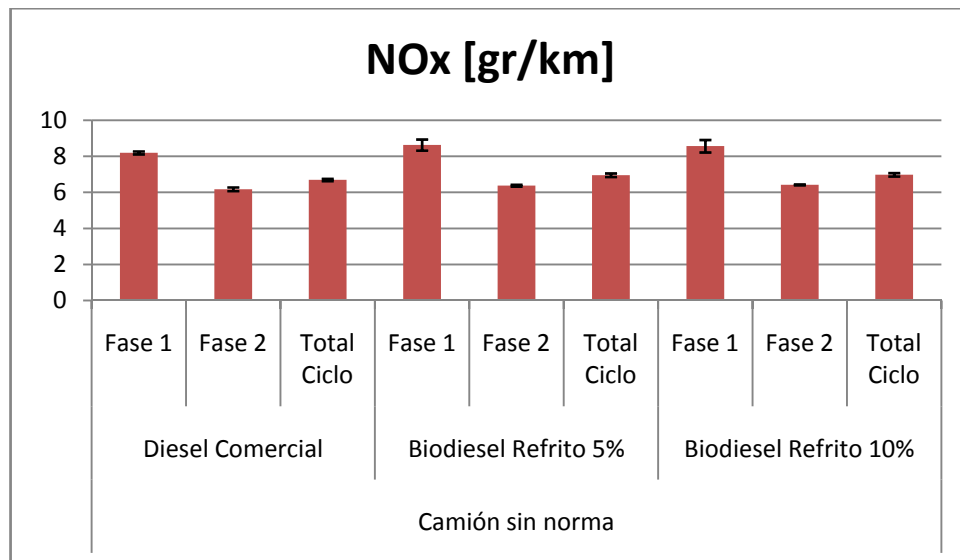


Fig. 4.2 Emisiones de NO<sub>x</sub> en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

Las emisiones de NOx, presentan un aumento en la fase 1, aunque sin tendencia con el aumento de porcentaje de biodiesel de la mezcla, pues el aumento es menor para la muestra con 10% de biodiesel. La fase 2 presenta nuevamente un aumento muy leve, teniendo por lo tanto el ciclo total un aumento leve, en relación a los valores totales, en sus emisiones de NOx. Nuevamente la fase 1 en los ensayos realizados con un 5% y 10% de biodiesel de aceite refrito tienen un alto valor en su desviación estándar.

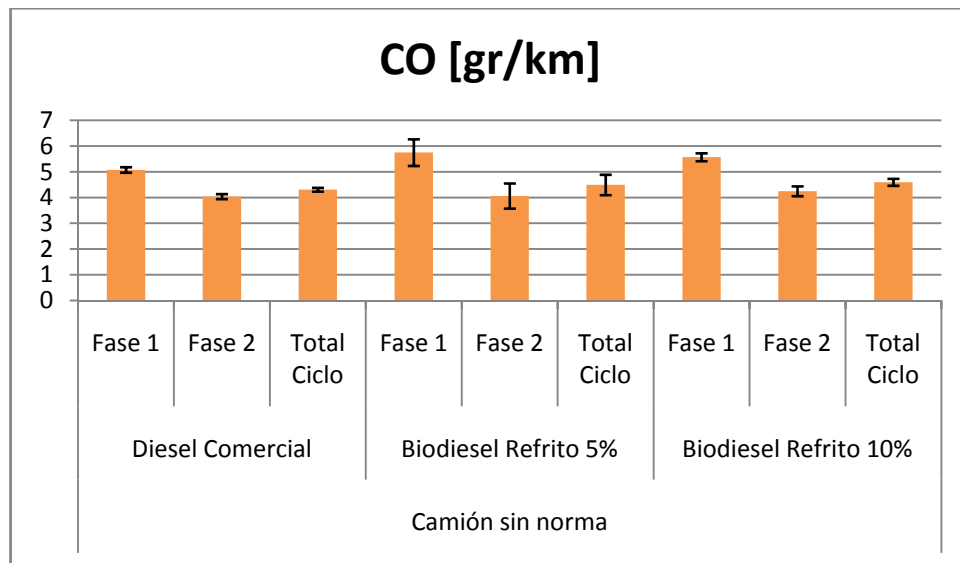


Fig. 4.3 Emisiones de CO en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito

Las emisiones de CO aumentan para la fase 1, en la misma proporción para la mezcla con 5% que para la mezcla con 10%, mientras que para la fase 2 se observa un aumento leve en las emisiones siendo este mayor al utilizar un mayor porcentaje de biodiesel en la mezcla, obteniéndose finalmente un leve aumento en las emisiones de CO para el ciclo total.



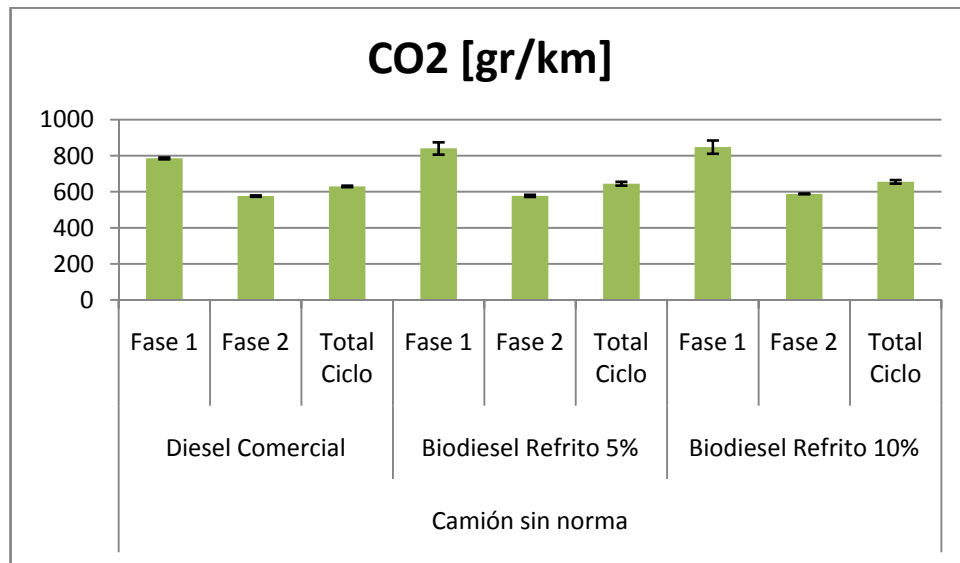


Fig. 4.4 Emisiones de CO<sub>2</sub> en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito

Para el caso del CO<sub>2</sub> se observa que la falta de tendencia que se ha observado en otros casos se repite en este, obteniéndose un aumento en las emisiones al utilizar biodiesel con respecto a las emisiones del diesel comercial, pero siendo este aumento menor al utilizar un mayor porcentaje de biodiesel de aceite refrito en la mezcla.

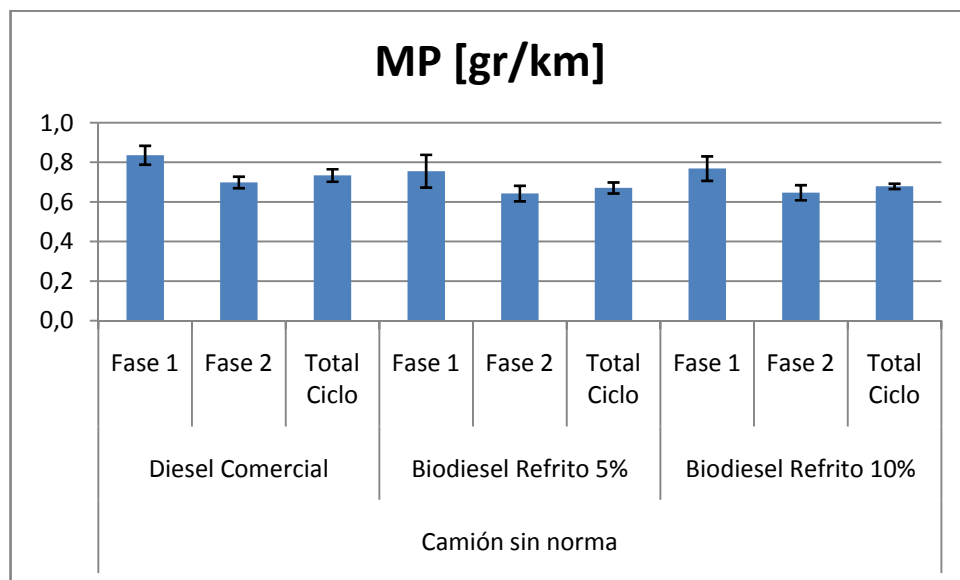


Fig. 4.5 Emisiones de MP en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito

Los valores obtenidos para las emisiones de Material particulado no presenta tampoco una tendencia clara, pues si bien se presentan reducciones en la fase 1 del ciclo para el

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

camión funcionando con un 5% de biodiesel, al aumentar la cantidad de biodiesel se tiene un leve aumento en las emisiones. Esta falta de tendencia se respalda por el alto valor de la desviación estándar. Así mismo, en la fase 2 si bien para ambas mezclas se tiene una reducción en la emisión de material particulado, la mezcla con mayor cantidad de biodiesel presenta una menor reducción en la emisión.

Al graficar el porcentaje de variación en las distintas emisiones para las dos mezclas de biodiesel de aceite refrito analizadas, con respecto a las emisiones asociadas al uso de diesel comercial, se obtiene la siguiente figura.

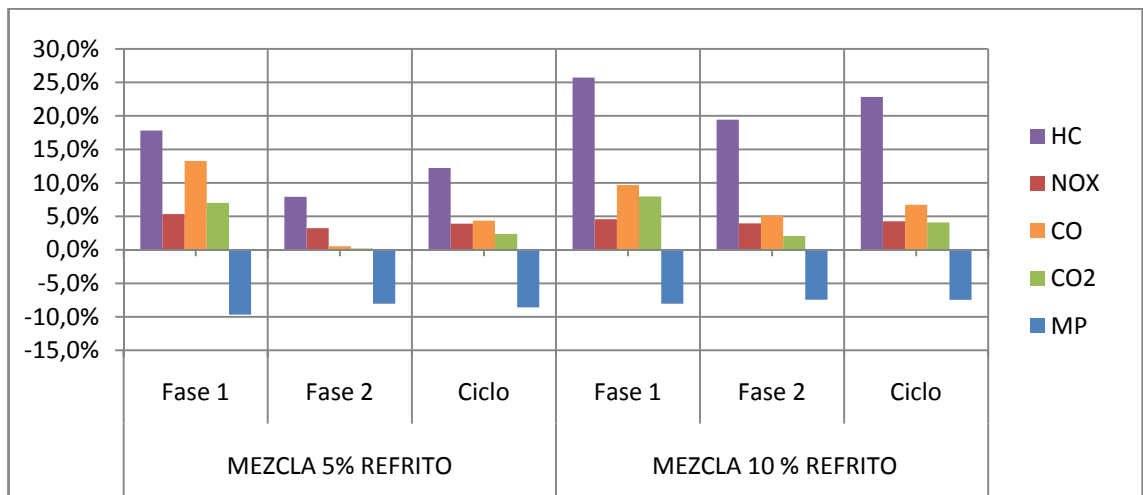


Fig. 4.6 Variaciones en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito

Se observa que el único contaminante que presenta reducciones en sus emisiones corresponde al material particulado. Mientras que el resto de los contaminantes presentan aumentos en sus emisiones, siendo en el caso del HC de importantes proporciones. Así mismo se tiene que en la gran parte de los casos el comportamiento no está vinculado con el aumento de biodiesel presente en la mezcla, de modo que no es posible asociar el comportamiento al uso de biodiesel de aceite refrito.

Al graficar las emisiones promedio de distintos contaminantes, tanto para el diesel comercial como para el biodiesel de raps nacional, se obtienen las siguientes figuras. En cada barra la línea corresponde a la desviación estándar.

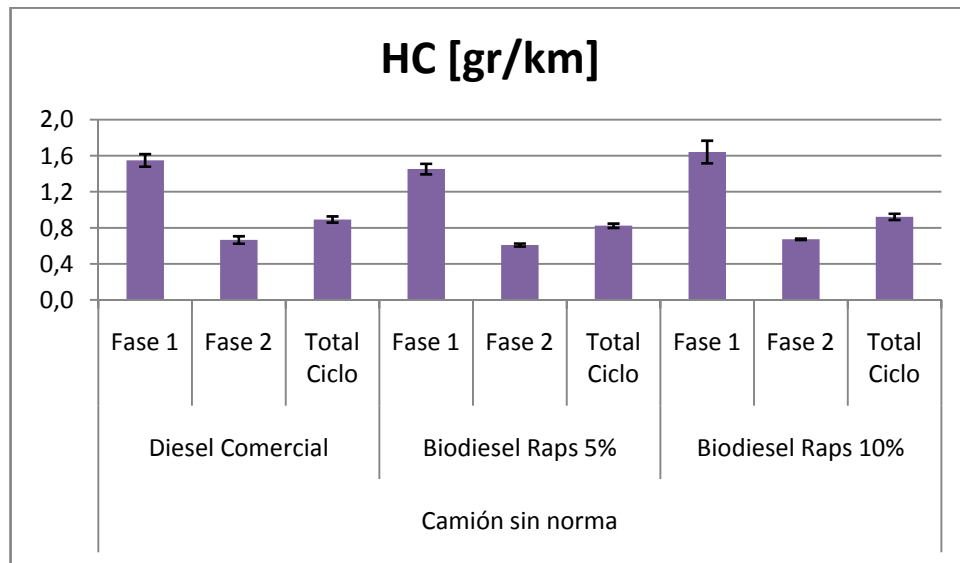


Fig. 4.7 Emisiones de HC en camión sin norma con biodiesel de raps

En sus dos fases y en el ciclo total, las emisiones de HC presentan variaciones muy leves tanto para la mezcla con un 5% como para la mezcla con un 10% de biodiesel, siendo en todos los casos las variaciones menores a la desviación estándar de cada ensayo.

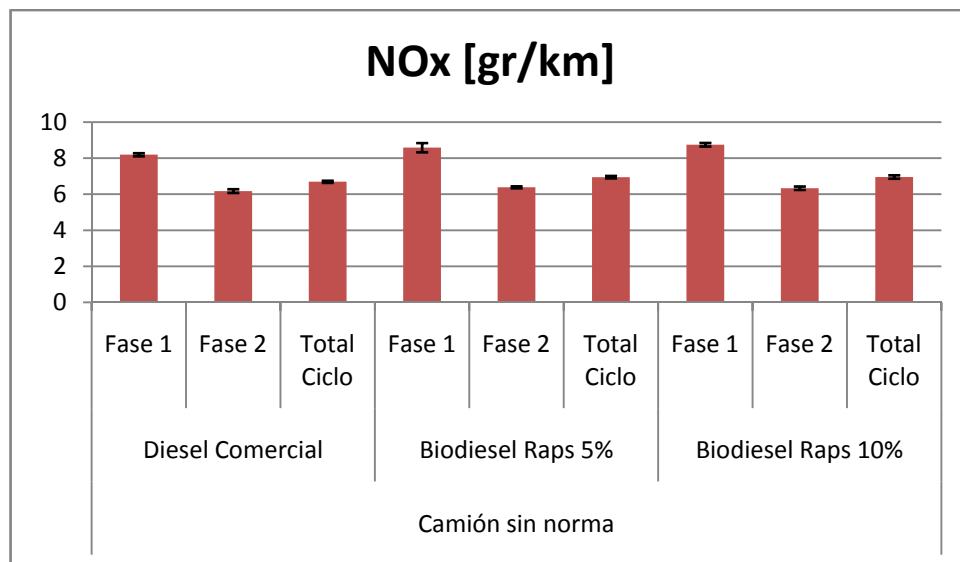


Fig. 4.8 Emisiones de NO<sub>x</sub> en camión sin norma con biodiesel de raps

Las emisiones de NO<sub>x</sub> presentan leves aumentos en la fase 1 del ciclo, para las dos mezclas, y variaciones muy leves en la fase 2. Presentando un aumento muy leve en el ciclo total.

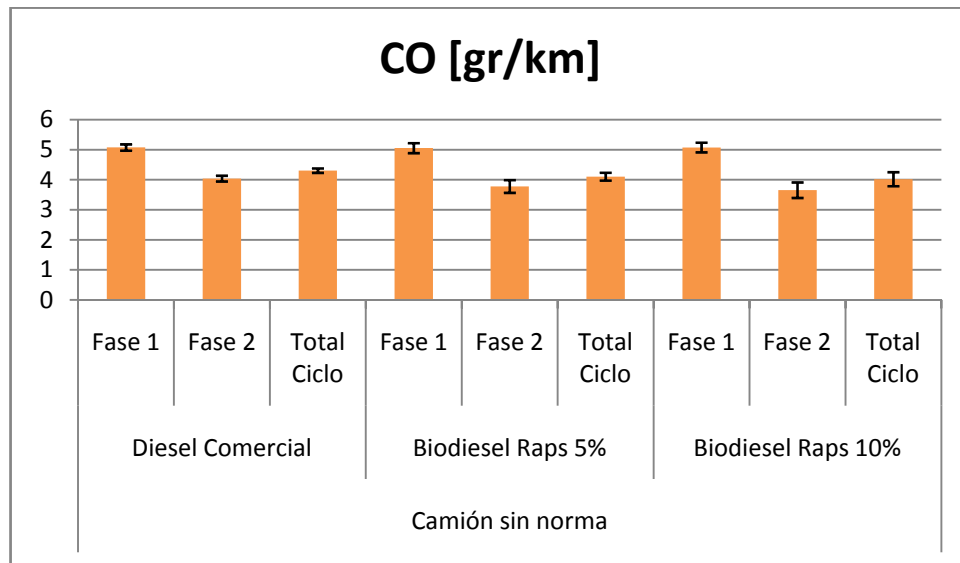


Fig. 4.9 Emisiones de CO en camión sin norma con biodiesel de raps

Las emisiones de CO presentan en la fase 1 variaciones muy pequeñas y menores a la desviación estándar, mientras que en la fase 2 presenta una leve reducción, obteniéndose finalmente leves reducciones en las emisiones de CO para el ciclo total.

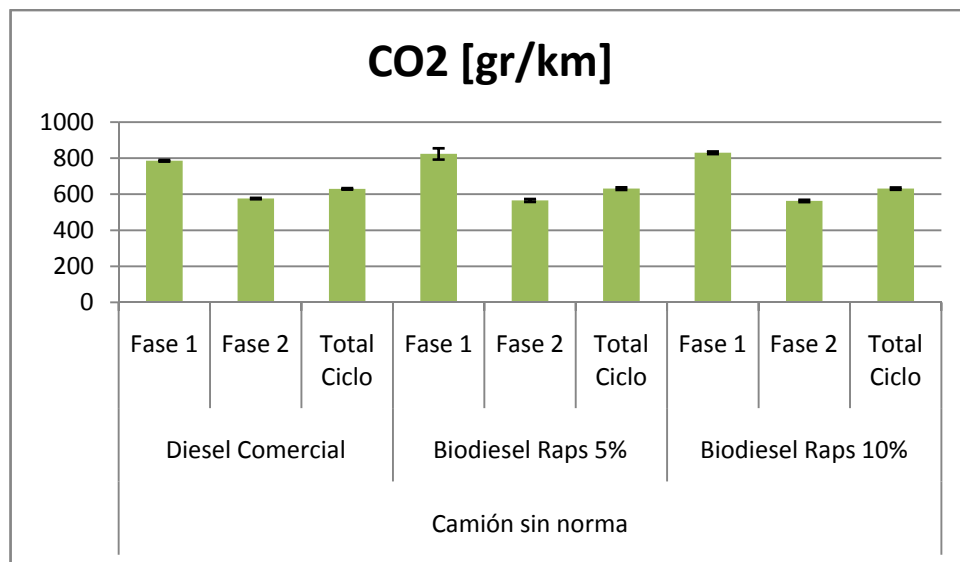


Fig. 4.10 Emisiones de CO<sub>2</sub> en camión sin norma con biodiesel de raps

El CO<sub>2</sub> presenta un aumento de emisiones en la fase 1 consistente con el aumento de porcentaje de biodiesel, y por el contrario una reducción de emisiones en la fase 2 pero también consistente con el aumento de porcentaje de biodiesel en la mezcla.

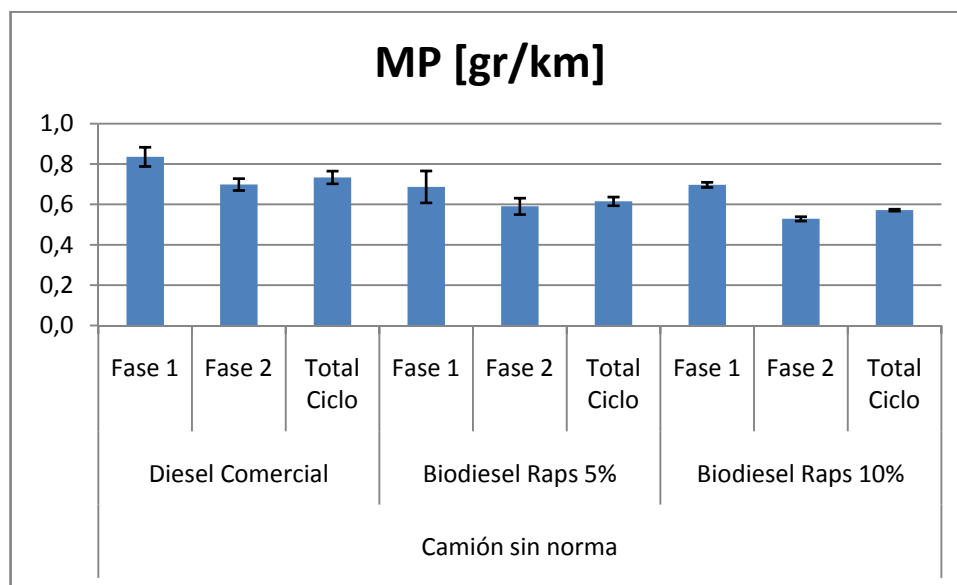


Fig. 4.11 Emisiones de MP en camión sin norma con biodiesel de raps

El material particulado presenta reducciones en sus emisiones para las dos fases y por lo tanto para el ciclo total. Si bien en la fase 1 las reducciones con un 5% son muy ligeramente mayores a las reducciones presentadas en la mezcla con un 10% de biodiesel, se tiene en este caso un alto valor en la desviación estándar, similar al valor en la desviación estándar de la fase 1 con diesel comercial.

Al graficar el porcentaje de variación en las distintas emisiones para las dos mezclas de biodiesel de raps analizadas, con respecto a las emisiones asociadas al uso de diesel comercial, se obtiene la siguiente figura.

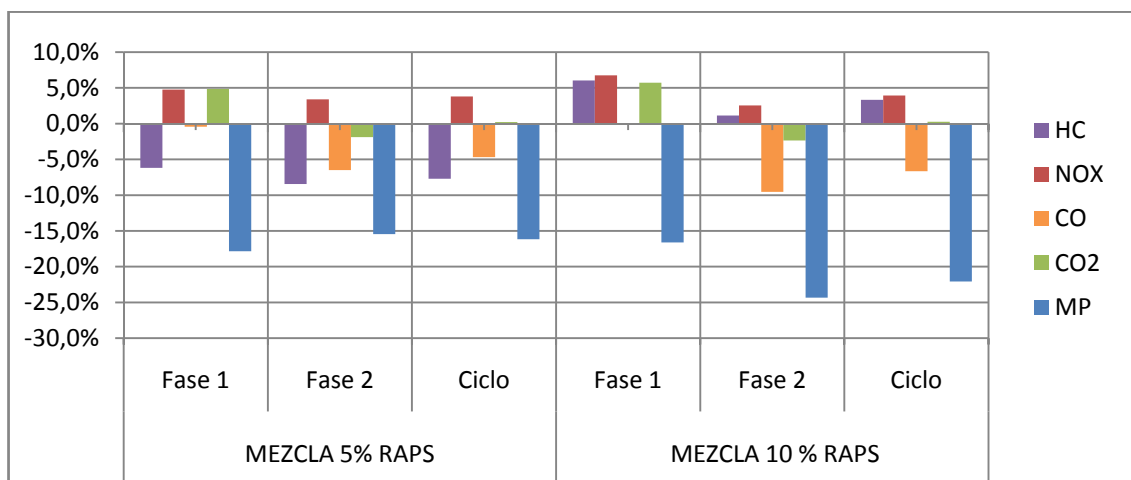


Fig. 4.12 Variaciones en camión sin norma con biodiesel de raps

Se observa que las reducciones más importantes son las de material particulado, siendo similares para un 5% y un 10% de la mezcla en la fase 1, y acorde al aumento en el porcentaje de biodiesel para la fase 2. El CO presenta reducciones en la fase 2, similares para ambas mezclas. Mientras que el HC y el CO2 presentan comportamientos inconsistentes al porcentaje de biodiesel utilizado en la mezcla.

## 4.2 Resultados de los ensayos en camión con norma

4.3 Se presenta un resumen de los valores de emisiones del ensayo realizado en un camión con norma de emisiones operando con diesel comercial, con biodiesel de aceite refrito y con biodiesel de raps nacional. Para cada fase y para el ciclo total se presentan los valores promedio de las 4 repeticiones y la desviación estándar correspondiente, un mayor detalle de estos resultados se presenta en el ANEXO B

### 4.3.1 Ficha Técnica camión sin norma

FICHA TECNICA	DJ-4964	
Identificación	Patente	DJ-4964
	Código	PESSN1983
	Categoría Camión	Pesado Plataforma
	Año	1986

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

	Km Recorridos	435200
	Fecha Chequeo 3CV	30/01/2008
	Fecha Llegada 3CV	04/02/2008
	Fecha Retiro 3CV	12/02/2008
Chasis	VIN	701933
	Marca	Mercedes Benz
	Modelo	OM-1419
Proveedor	Representante Chile	Kauffmann
	Origen	Brasil
Dimensiones	PBV [Kg]	21845
	Peso en Vacío [kg]	14995
	Carga Máxima [kg]	12000
	Largo [m]	6,2
	Ancho [m]	2,5
Motor	Marca	MERCEDES BENZ
	Modelo	OM-401
	Nº Motor	9030806
	Tipo de Inyección	BOMBA EN LINEA
	Pot. Máxima [CV]	190 CV
	Cilindrada [cm3]	7000
	Nº Cilindros	6
	Posición Cilindros	V
	Nº Valv. X Cilindro	3
	Turbo	NO
	Intercooler	NO
Norma Emisión	S/N	
Caja de cambios	Tipo	Mecánica
	Nº Marchas	12
Sistema de frenos	Accionamiento	Neumatico de 2 circuitos
	Eje Delantero	Tambor
	Eje Trasero	Tambor
Sistema eléctrico	Nº Baterías	2
	Tensión	24 V
	Alternad.	80 A
	Bater.(Ah)	135
Combustible	Tipo HC	Diesel
	Cap.est. [Its]	300

### 4.3.2 Ficha técnica camión con norma

FICHA TECNICA	NY-2308	
Identificación	Patente	NY-2308
	Código	PESEII1996
	Categoría Camión	Pesado Plataforma
	Año	1996
	Km Recorridos	207113

CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

	Fecha Chequeo 3CV	14/02/2008
	Fecha Llegada 3CV	18/02/2008
	Fecha Retiro 3CV	27/02/2008
Chasis	VIN	ZCFA1LLH0T2161058
	Marca	Iveco
	Modelo	150 E 27 R
Proveedor	Representante Chile	Sigdotek
	Origen	Italia
Dimensiones	PBV [Kg]	17650
	Peso en Vacío [kg]	12650
	Carga Máxima [kg]	10000
	Largo [m]	6,15
	Ancho [m]	2,45
Motor	Marca	IVECO
	Modelo	8360.46
	Nº Motor	223716
	Tipo de Inyección	BOMBA EN LINEA
	Pot. Máxima [CV]	196 KW
	Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]	9000
	Posición Cilindros	V
	Nº Valv. X Cilindro	4
	Turbo	SI
	Intercooler	SI
Caja de cambios	Norma Emisión	EURO II
	Tipo	Mecánica
Neumáticos - llantas	Nº Marchas	8
	Dimen. Eje Delantero	275/80 R22,5
	Dimen. Eje Trasero	275/80 R22,5
	Llantas Eje Delantero	8,25 x 22,5
	Llantas Eje Trasero	8,25 x 22,5
Sistema de frenos	Accionamiento	Neumatico de Circuitos Independientes
	Eje Delantero	Tambor
	Eje Trasero	Tambor
Sistema eléctrico	Nº Baterías	2
	Tensión	24 V
	Alternad.	80 A
	Bater.(Ah)	135
Combustible	Tipo HC	Diesel
	Cap.est. [lts]	500

ANEXO .



CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 4.7 Emisiones en camión con norma con diesel comercial

		Diesel Comercial		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,16	0,34	0,55
	Desv. Est.	0,07	0,04	0,05
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	6,58	3,95	4,63
	Desv. Est.	0,16	0,05	0,04
CO [gr/km]	Prom Ciclo	14,49	17,31	16,58
	Desv. Est.	0,66	0,29	0,37
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	672	489	536
	Desv. Est.	12,61	4,56	4,99
MP [gr/km]	Prom Ciclo	1,57	1,83	1,76
	Desv. Est.	0,20	0,06	0,07

Tabla 4.8 Emisiones en camión con norma con mezcla de biodiesel de aceite refrito

		Biodiesel Refrito 5%			Biodiesel Refrito 10%		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,30	0,31	0,56	1,37	0,32	0,59
	Desv. Est.	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	6,78	4,21	4,86	6,77	4,25	4,89
	Desv. Est.	0,12	0,17	0,15	0,13	0,16	0,12
CO [gr/km]	Prom Ciclo	13,29	11,57	12,01	11,43	10,35	10,63
	Desv. Est.	0,73	0,80	0,62	0,42	0,41	0,21
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	708	496	550	728	495	555
	Desv. Est.	13,20	7,55	6,60	7,23	9,22	6,58
MP [gr/km]	Prom Ciclo	1,15	0,94	1,00	1,08	0,83	0,90
	Desv. Est.	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabla 4.9 Emisiones en camión con norma con mezcla de biodiesel de raps

		Biodiesel Raps 5%			Biodiesel Raps 10%		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,29	0,32	0,56	1,24	0,33	0,56
	Desv. Est.	0,15	0,05	0,06	0,04	0,03	0,01
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	6,94	4,14	4,85	6,83	4,24	4,90
	Desv. Est.	0,09	0,23	0,19	0,17	0,14	0,11
CO [gr/km]	Prom Ciclo	13,00	13,00	13,00	13,49	12,74	12,93
	Desv. Est.	1,26	1,08	0,60	0,17	0,04	0,02

CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

<b>CO2</b> [gr/km]	<b>Prom Ciclo</b>	728	493	553	737	498	559
	<b>Desv. Est.</b>	15,15	5,75	7,89	13,51	11,24	10,40
<b>MP</b> [gr/km]	<b>Prom Ciclo</b>	1,41	1,30	1,33	1,38	1,30	1,32
	<b>Desv. Est.</b>	0,22	0,10	0,02	0,05	0,07	0,06

A modo de determinar las reducciones en las emisiones para las dos clases de biodiesel, con respecto a las emisiones del diesel comercial, se presenta el siguiente cuadro comparativo. Los valores positivos corresponden a reducciones en las emisiones al utilizar biodiesel y los valores negativos corresponden a aumentos de las emisiones.

**Tabla 4.10 Variaciones en camión con norma con biodiesel de aceite refrito**

	MEZCLA 5% REFRITO			MEZCLA 10% REFRITO		
	Fase 1	Fase 2	Ciclo	Fase 1	Fase 2	Ciclo
<b>HC</b>	↓ 12,6%	↗ -9,3%	↘ 1,9%	↓ 18,2%	↗ -5,5%	↘ 6,7%
<b>NO<sub>x</sub></b>	↘ 3,1%	↘ 6,5%	↘ 5,0%	↘ 3,0%	↘ 7,6%	↘ 5,7%
<b>CO</b>	↗ -8,3%	↑ -33,2%	↑ -27,6%	↑ -21,1%	↑ -40,2%	↑ -35,9%
<b>CO<sub>2</sub></b>	↘ 5,2%	↘ 1,4%	↘ 2,5%	↘ 8,3%	↘ 1,3%	↘ 3,4%
<b>MP</b>	↑ -26,5%	↑ -48,5%	↑ -43,4%	↑ -30,9%	↑ -54,3%	↑ -49,0%

**Tabla 4.11 Variaciones en camión con norma con biodiesel de raps**

	MEZCLA 5% RAPS			MEZCLA 10% RAPS		
	Fase 1	Fase 2	Ciclo	Fase 1	Fase 2	Ciclo
<b>HC</b>	↓ 11,5%	↗ -7,7%	↘ 2,1%	↘ 7,1%	↗ -4,5%	↘ 1,3%
<b>NO<sub>x</sub></b>	↘ 5,5%	↘ 4,8%	↘ 4,8%	↘ 3,8%	↘ 7,4%	↘ 5,9%
<b>CO</b>	↑ -10,3%	↑ -24,9%	↑ -21,6%	↗ -6,9%	↑ -26,4%	↑ -22,0%
<b>CO<sub>2</sub></b>	↘ 8,2%	↘ 0,7%	↘ 3,0%	↘ 9,6%	↘ 1,8%	↘ 4,2%
<b>MP</b>	↑ -10,3%	↑ -28,8%	↑ -24,6%	↑ -12,2%	↑ -29,1%	↑ -25,2%

Además, a modo de determinar posibles problemas en el camión ensayado, se comparan las emisiones del vehículo operando con diesel comercial, con un rango de valores esperado a partir de otras fuentes:

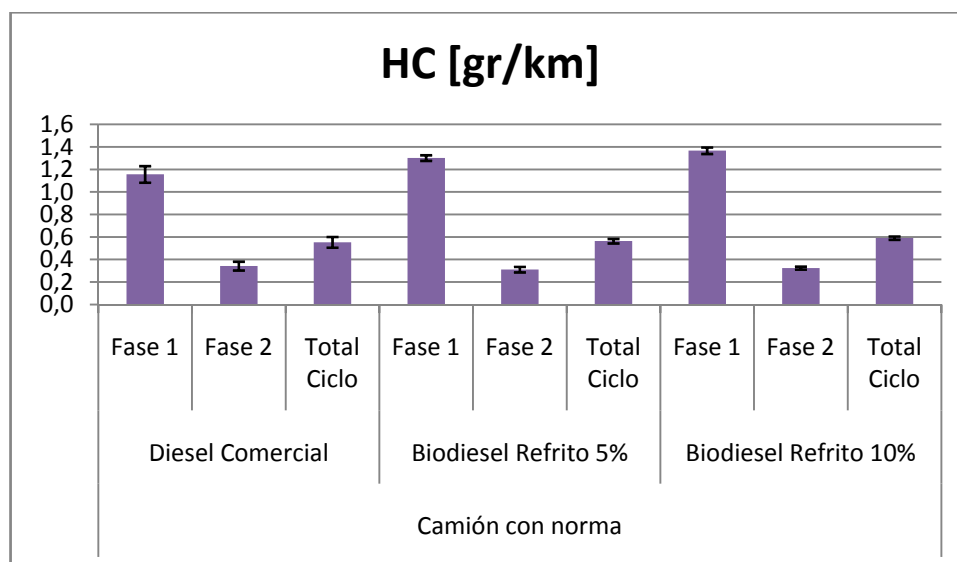
**Tabla 4.12 Comparación de diesel comercial con rangos esperado**

	Rango Esperado	Valor Experimental
<b>MP</b>	0,2 – 0,4	1,6
<b>NO<sub>x</sub></b>	5 – 7	6,4
<b>HC</b>	0,5 – 2	1,2
<b>CO</b>	1 - 3	15,4

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

Al observar los resultados obtenidos en el camión con norma Euro II, llama la atención los altos valores de las emisiones del camión, en todas las mezclas utilizadas, incluyendo el diesel comercial, principalmente de material particulado y CO, en este último caso siendo hasta 10 veces mayor que valores de referencia para un camión con la misma norma, y siendo además por lo general sus emisiones mayores a las del camión sin norma. Aún así es posible observar un comportamiento en las emisiones al variar la mezcla de combustible utilizada, por lo cual un análisis de los resultados es necesario para determinar este comportamiento.

Al graficar las emisiones promedio de distintos contaminantes, tanto para el diesel comercial como para el biodiesel de aceite refrito se obtienen las siguientes figuras. En cada barra la línea corresponde a la desviación estándar.



**Fig. 4.13 Emisiones de HC en camión con norma con biodiesel de aceite refrito**

No se observan variaciones en las emisiones de HC en ninguna de las fases y para ningún porcentaje de biodiesel.

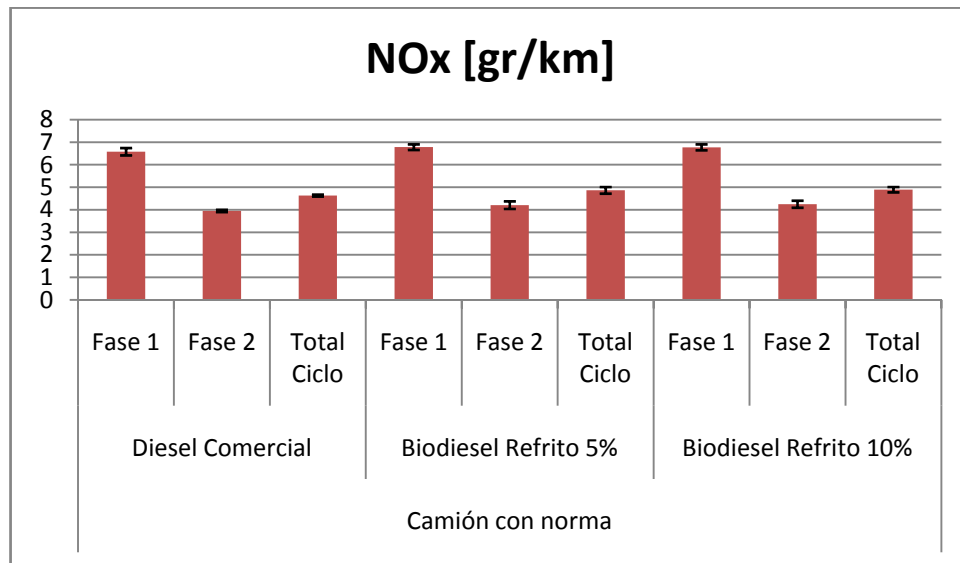


Fig. 4.14 Emisiones de NO<sub>x</sub> en camión con norma con biodiesel de aceite refrito

Se presentan aumentos leves en las emisiones de NO<sub>x</sub>, en la fase 1 y fase 2 y por lo tanto en el ciclo total, siendo el aumento el mismo para la mezcla con 5% que para la mezcla con un 10% de biodiesel.

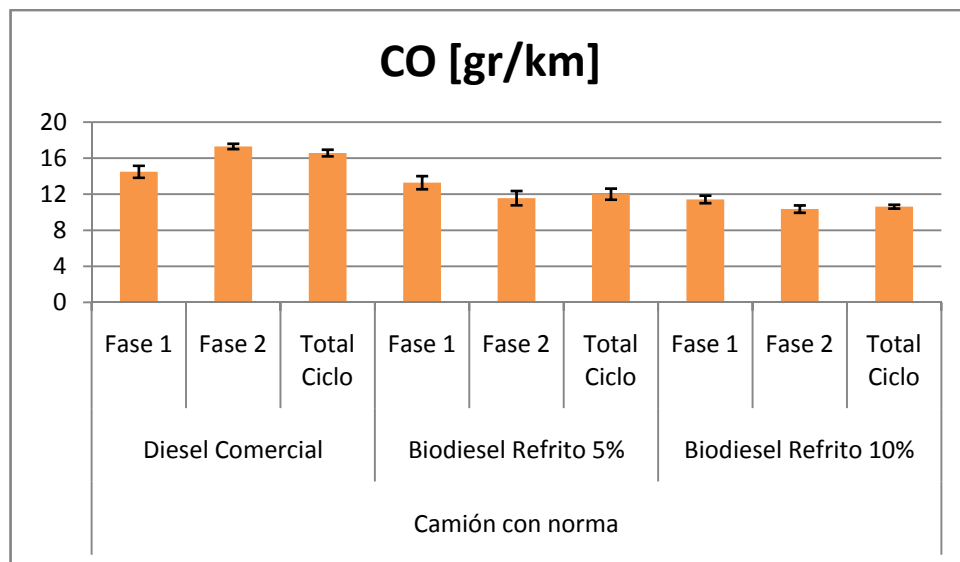


Fig. 4.15 Emisiones de CO en camión con norma con biodiesel de aceite refrito

Se observan reducciones en las emisiones de CO, en las dos fases y por lo tanto en el ciclo total, en los dos casos la reducción es mayor al aumentar el porcentaje de biodiesel utilizado en la mezcla.

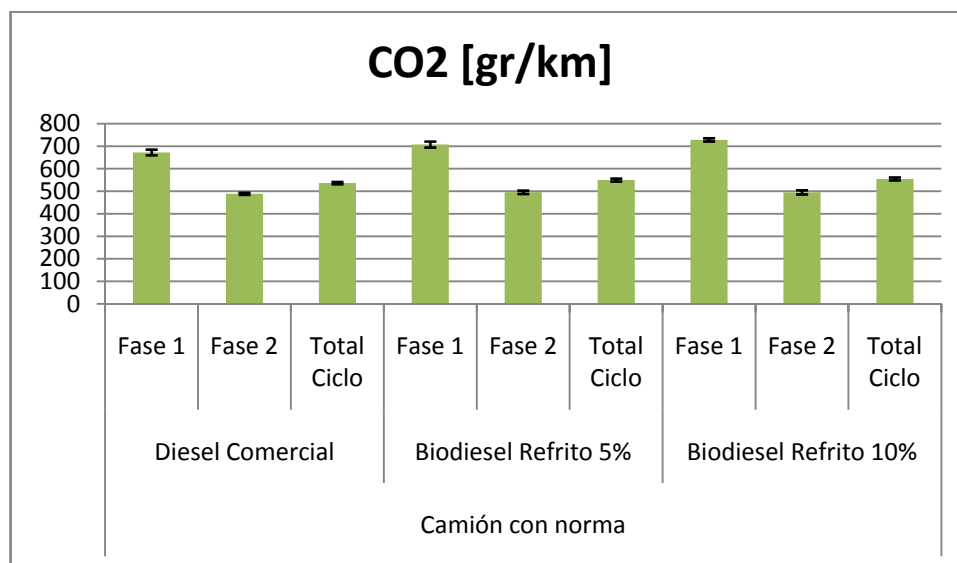


Fig. 4.16 Emisiones de CO<sub>2</sub> en camión con norma con biodiesel de aceite refrito

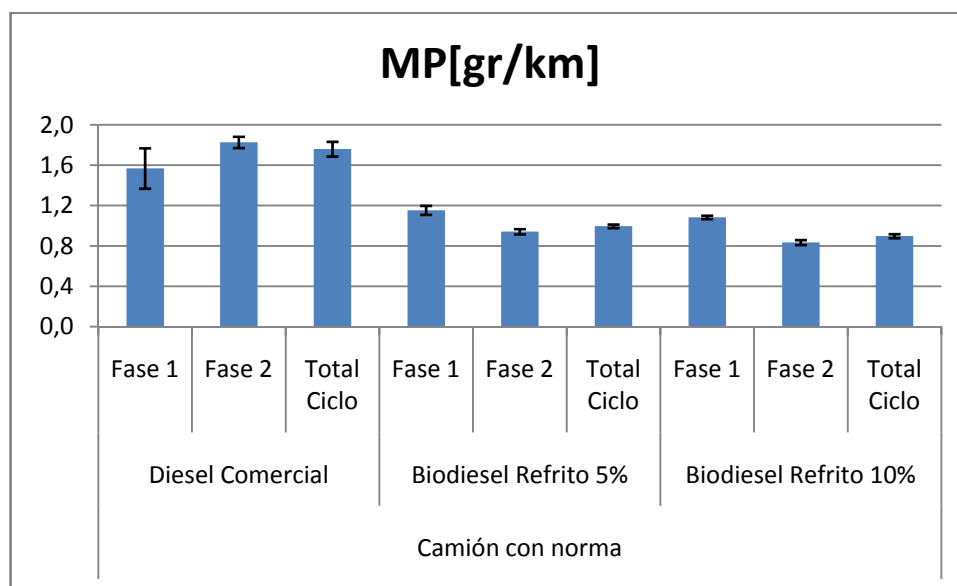
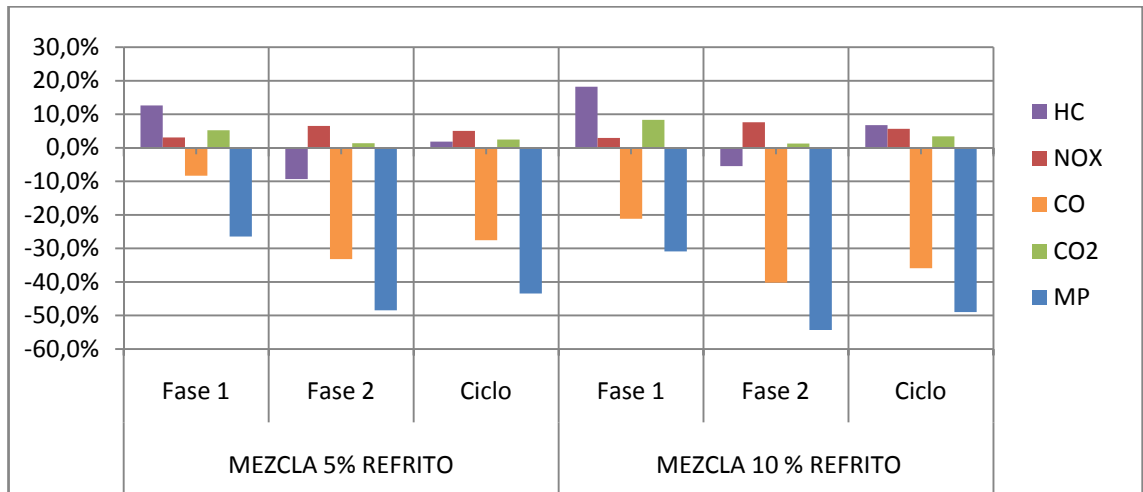


Fig. 4.17 Emisiones de MP en camión con norma con biodiesel de aceite refrito

Se observan reducciones en las emisiones de material particulado, en las dos fases y por lo tanto en el ciclo total, en los dos casos la reducción es mayor al aumentar el porcentaje de biodiesel utilizado en la mezcla.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

Al graficar el porcentaje de variación en las distintas emisiones para las dos mezclas de biodiesel de aceite refrito analizadas, con respecto a las emisiones asociadas al uso de diesel comercial, se obtiene la siguiente figura.



**Fig. 4.18 Variaciones en camión con norma con biodiesel de aceite refrito**

El material particulado cuenta con la mayor reducción en sus emisiones, siendo además esta reducción consistente con el aumento en la proporción de biodiesel en la mezcla utilizada. Este comportamiento se repite para el CO que también tiene importantes reducciones. El NOx y el CO2 tienen leves aumentos en sus emisiones, aumentos que también son mayores al aumentar el porcentaje de biodiesel de la mezcla. Finalmente, el HC vuelve a presentar un comportamiento con variaciones muy leves y erráticas a través de las fases y porcentajes de biodiesel utilizados.

Al graficar las emisiones promedio de distintos contaminantes, tanto para el diesel comercial como para el biodiesel de raps nacional se obtienen las siguientes figuras. En cada barra la línea corresponde a la desviación estándar.

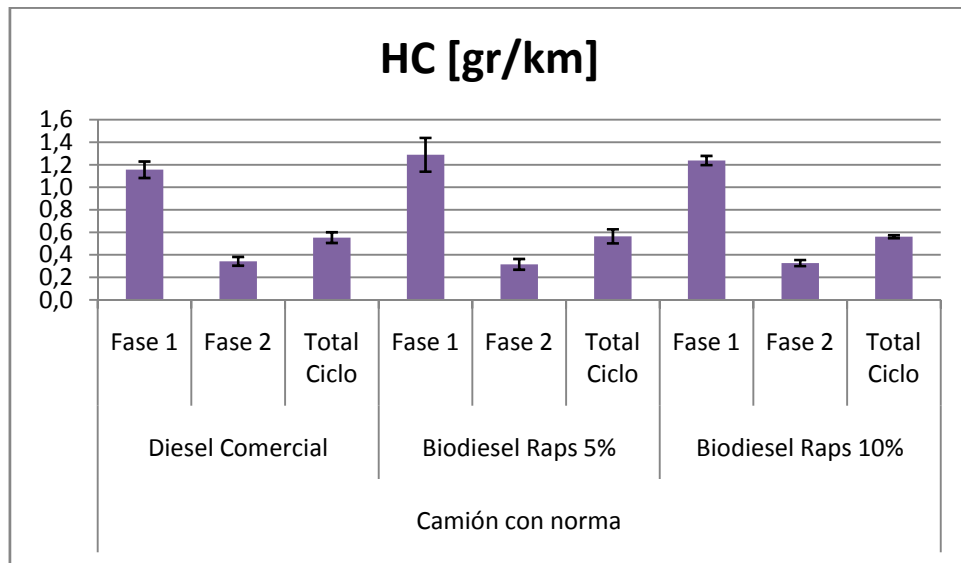


Fig. 4.19 Emisiones de HC en camión con norma con biodiesel de raps

No se observan variaciones en las emisiones de HC en ninguna de las fases y para ningún porcentaje de biodiesel.

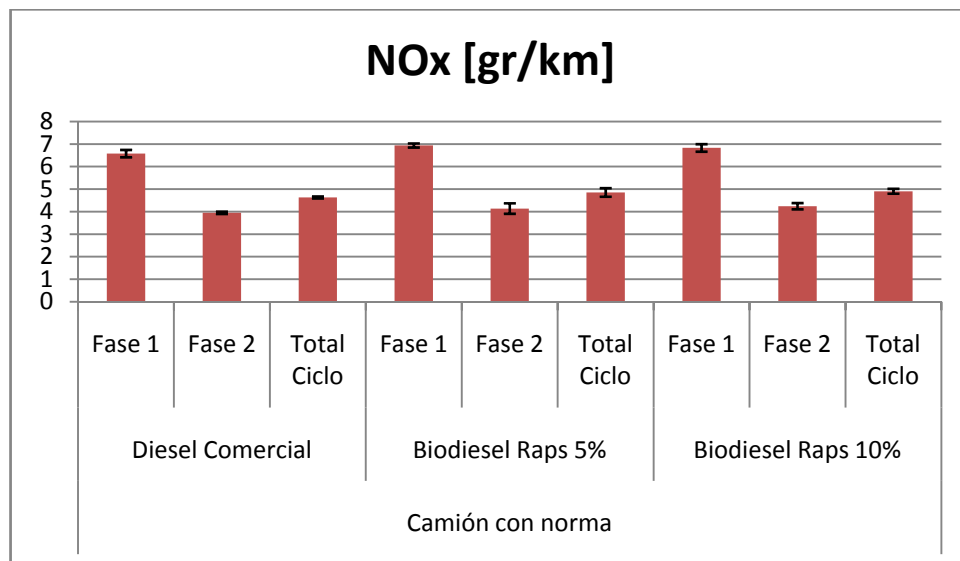


Fig. 4.20 Emisiones de NO<sub>x</sub> en camión con norma con biodiesel de raps

Las emisiones de NO<sub>x</sub> presentan un leve aumento en sus emisiones en las dos fases del ciclo y por lo tanto en el ciclo total, siendo este aumento mayor al aumentar el porcentaje de biodiesel utilizado en la mezcla.

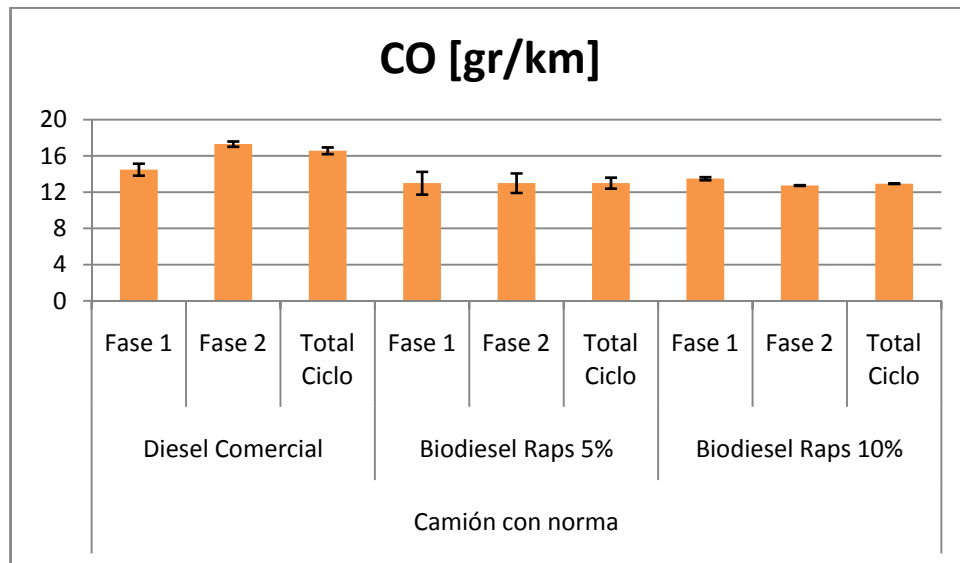


Fig. 4.21 Emisiones de CO en camión con norma con biodiesel de raps

En la fase 1 se observa una reducción en las emisiones de CO, y si bien esta reducción es mayor en la mezcla con un 5% de biodiesel la diferencia entre las emisiones del vehículo con un 5% y un 10% es menor a la desviación estándar de ambos casos. La fase 2 presenta una reducción más marcada en las emisiones de CO siendo en la mezcla con un 5% y la mezcla con un 10% de biodiesel la misma reducción. Luego en el ciclo completo se presenta una reducción en las emisiones de CO del mismo valor al aumentar el porcentaje de biodiesel de un 5% a un 10%.

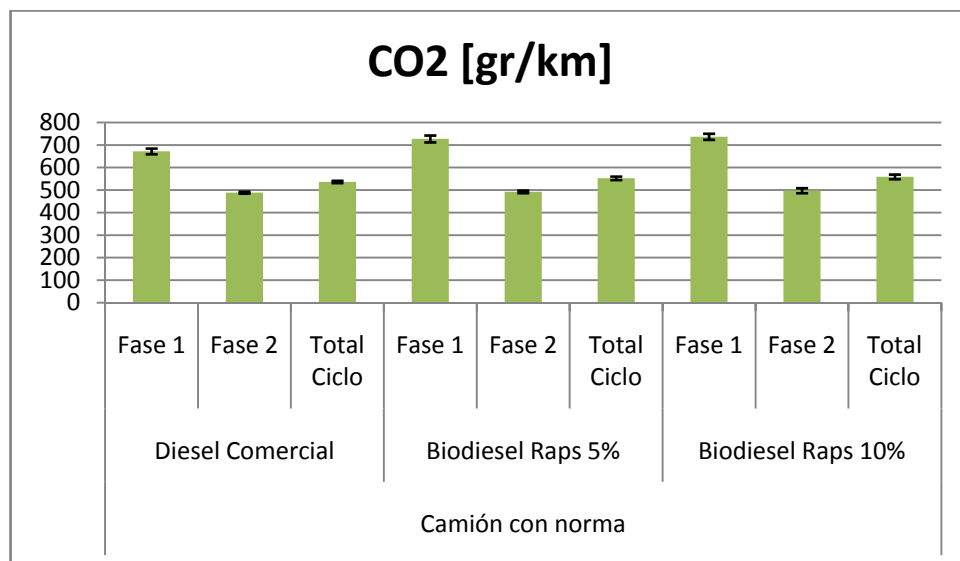


Fig. 4.22 Emisiones de CO<sub>2</sub> en camión con norma con biodiesel de raps



## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

La fase 1 y 2 presentan aumentos en la emisión de CO<sub>2</sub>, este aumento es mayor al ser mayor el porcentaje de biodiesel presente en la mezcla.

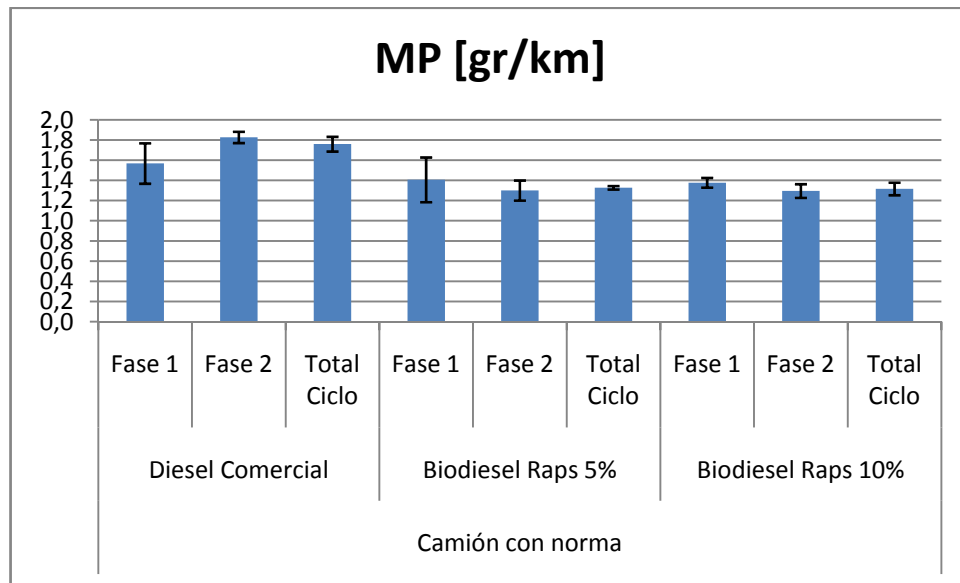


Fig. 4.23 Emisiones de MP en camión con norma con biodiesel de raps

En la fase 1 se presentan reducciones en las emisiones de material particulado, nuevamente mayores al tener un menor porcentaje de biodiesel, comportamiento que puede asociarse a los altos valores de la desviación estándar en la fase 1. La fase 2 presenta una reducción más clara en sus emisiones de material particulado, siendo la misma reducción para los dos porcentajes de biodiesel estudiados. Finalmente, el ciclo completo presenta una reducción en las emisiones de material particulado, siendo estas muy similares para un 5% y un 10% de biodiesel en la mezcla.

Al graficar el porcentaje de variación en las distintas emisiones para las dos mezclas de biodiesel de raps analizadas, con respecto a las emisiones asociadas al uso de diesel comercial, se obtiene la siguiente figura.

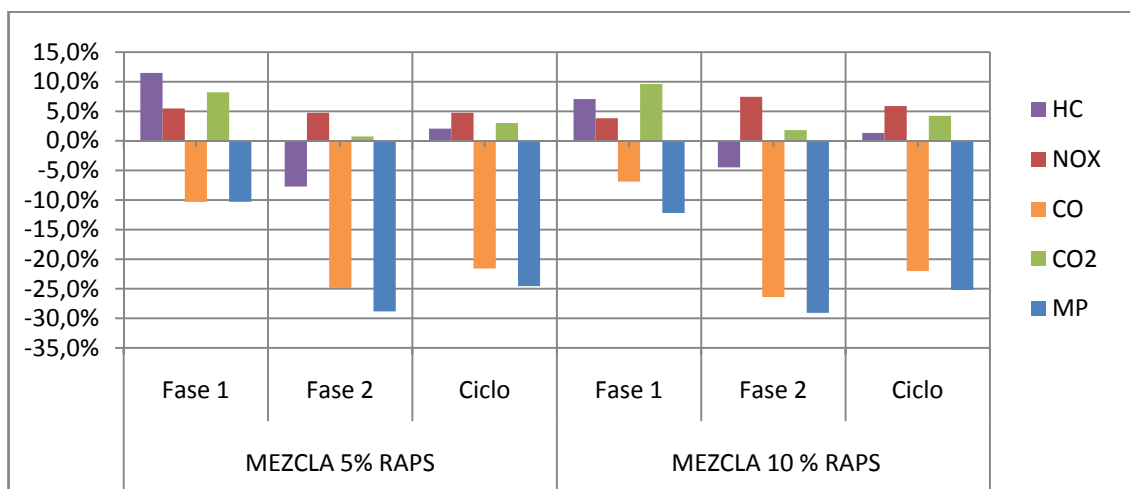


Fig. 4.24 Variaciones en camión con norma con biodiesel de raps

Se observa que la principal reducción corresponde a la de material particulado, siendo similar para un 5% y un 10% en la fase 2 y en la fase 1 menor para el caso de la mezcla al 10%. Las emisiones de CO tienen una reducción en sus emisiones también menores para un 10% que para un 5% de biodiesel en la mezcla para la fase 1, mientras que en la fase 2 los valores son similares. Estas dos inconsistencias en la fase 1 pueden estar relacionadas con un alto valor de la desviación estándar de todas las mediciones en esa fase principalmente en el ensayo con un 5% de biodiesel de raps. El CO2 y el NOx presentan un leve aumento en sus emisiones los cuales son mayores al aumentar el porcentaje de biodiesel de la muestra. Nuevamente el HC presenta un comportamiento con variaciones muy leves e inconsistentes con las fases y los porcentajes de biodiesel de la mezcla.

#### 4.4 Resultados de los análisis a los combustibles

Se analizaron propiedades químicas para las muestras de combustible diesel utilizadas en los dos camiones y para los dos tipos de biodiesel utilizados. Esto se realizó con el fin de determinar las propiedades que influyen en el comportamiento obtenido para las distintas emisiones.

Los resultados obtenidos de los análisis a las dos muestras de diesel comercial (utilizados en el camión sin norma y el camión con norma respectivamente) se presentan en las siguientes tablas:

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

**Tabla 4.13 Propiedades del diesel comercial utilizado en camión sin norma**

Propiedad	Unidad	Resultado	Norma
Densidad a 15%	kg/m <sup>3</sup>	842,3	830-850
Azufre	ppm	22	Max 50
Destilación al 90%	°C	332	282-338
Índice de cetano	-	50,6	Min 50
Punto de Inflamación	°C	61	Min 54
Viscosidad a 40%	mm <sup>2</sup> /s	3,04	1,9-4,1

**Tabla 4.14 Propiedades del diesel comercial utilizado en camión con norma**

Propiedad	Unidad	Resultado	Norma
Densidad a 15%	kg/m <sup>3</sup>	840,3	830-850
Azufre	ppm	21	Max 50
Destilación al 90%	°C	333	282-338
Índice de cetano	-	51,9	Min 50
Punto de Inflamación	°C	59	Min 54
Viscosidad a 40%	mm <sup>2</sup> /s	3,19	1,9-4,1

Se observa que las dos muestras de diesel comercial utilizado, para los dos camiones, cumplen con todas las normas correspondientes por lo que no se esperaría ningún comportamiento especial asociado al diesel utilizado de base para la mezcla.

A continuación se presentan los resultados de los análisis químicos realizados en las muestras de biodiesel utilizados en los ensayos en camiones y su comparación con la norma Europea para biodiesel EN 14.214.

**Tabla 4.15 Propiedades químicas de los dos tipos de biodiesel**

PROPIEDADES	RESULTADOS		
	Biodiesel raps	Biodiesel fritura	EN 14.214
Contenido de esteres (% m/m)	81,24	44,19	>96,5%
Densidad a 15°C (g/mL)	0,883	0,891	0,860-0,900
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	4,821	6,859	3,5 - 5,0
Contenido en agua (% m/m)	0,374	0,403	< 500(mg/kg)
Contenido en metanol (% p/p)	0,103	0,264	< 0,2
Índice de yodo (g yodo/100 g)	91,1	98,1	< 120
Valor de acidez (mg KOH/ g)	0,22	0,23	< 0,5
Contenido en metilesteres de ácido linoléico y poliinsaturados	4,88	-	

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis de resultados indica que la densidad está dentro de los rangos de la Normativa Europea (EN 14.214) para ambos tipos de muestra, estando la viscosidad al límite permitido para el caso del biodiesel proveniente de raps, y claramente superior a la norma en el caso del biodiesel obtenido a partir del aceite de fritura. Ambos parámetros son una medida indirecta de la eficiencia de la transformación de los mono, di y triglicéridos en metilesteres. Los aceites que se utilizan para la producción de biodiesel poseen densidades del orden de 0,92 – 0,94 g/mL con viscosidades entre 33 y 37 mm<sup>2</sup>/s; el objetivo de la transesterificación es actuar sobre éstas y otras propiedades. El aceite mejora así sus propiedades como combustible líquido. La muestra de biodiesel proveniente de aceite recuperado no logra cumplir con valores bajo norma, lo cual presume un proceso de transesterificación insuficiente, esto se ve confirmado por el bajo contenido de esteres de ambos combustibles.

Cualitativamente las muestras mostraron estabilidad en almacenamiento, lo cual presupone una adecuada separación. No se observan jabones e insolubles, cuya formación se asocia a un aceite original con un valor de acidez elevado, donde los ácidos grasos libres (AGL) reaccionan con el catalizador alcalino produciendo jabón y agua, lo cual, bajo otras circunstancias, podría explicar el mayor contenido de agua.

El índice de yodo es una medida del grado de insaturación del biodiesel, y valores superiores a 120 (g/100 g) inducen la formación de depósitos carbonáceos. En ambas muestras los valores no superan la norma.

La muestra proveniente de raps presenta un bajo contenido de metanol, cumpliendo con la Normativa Europea. El biodiesel obtenido a partir de aceite residual exhibe un exceso de alcohol. Si bien un exceso de alcohol favorece el desplazamiento de la reacción hacia la formación de esteres, reduce la calidad del producto y compromete a un mayor esfuerzo en retirar este excedente. En general, el metanol debe ser recuperado después de la reacción, y su presencia en elevadas concentraciones puede acusar una separación ineficiente y/o una transesterificación con exceso desmedido de alcohol.

El valor de acidez se encuentra en Norma, siendo bajo aún para aceite residual. Si se utilizan aceites reciclados se debe tener en cuenta que estos poseen valores muy altos de acidez y por lo tanto la transesterificación alcalina no es del todo eficiente, ya que reaccionaría el catalizador alcalino con los AGL formando jabones y agua.

## Capítulo 5      Discusión de los resultados

---

### 5.1    Discusión resultados de los ensayos

#### 5.1.1    Análisis de las tendencias en las emisiones

Para cada uno de los contaminantes considerados se graficaron los resultados en la variación de las emisiones de modo de observar las tendencias para cada camión y tipo de biodiesel utilizado. Se considerará que existe una tendencia cuando un comportamiento que se presenta para una mezcla al 5% de biodiesel se mantiene o amplía al usar una mezcla del 10%. Se graficó además la variación esperada acorde a la teoría revisada en el capítulo 2.3 con el fin de comparar en una primera instancia los resultados obtenidos con los esperados. A continuación se presentan, por cada contaminante 3 gráficos, correspondientes al ciclo completo, a la fase 1 (urbana) y a la fase 2 (rural) respectivamente. S

El comportamiento del ciclo completo para las emisiones de HC se muestra en el siguiente gráfico.

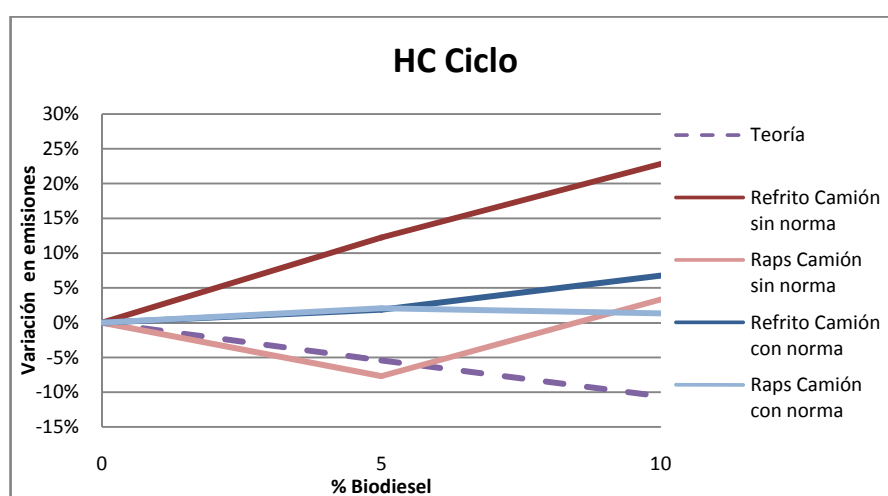


Fig. 5.1 Tendencias en las emisiones de HC, Ciclo completo

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El HC resultó ser el único contaminante que no presentó un comportamiento claro, pues las tendencias varían de un camión a otro y de un biodiesel a otro, encontrándose incluso casos como el del camión sin norma con biodiesel de raps el cual presenta una reducción de HC al 5% y un aumento al 10%. Así mismo, al comparar con la teoría se observa que el comportamiento es opuesto al esperado ya que en todos los casos las emisiones de HC aumentan, cuando se espera que disminuyan.

Si se desglosa el ciclo en las dos fases que lo conforman se obtienen los siguientes gráficos.

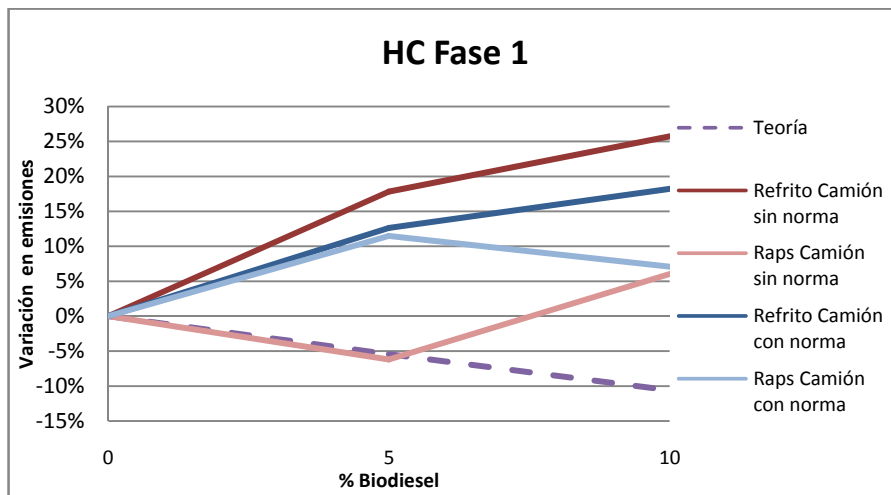


Fig. 5.2 Tendencias en las emisiones de HC, fase 1

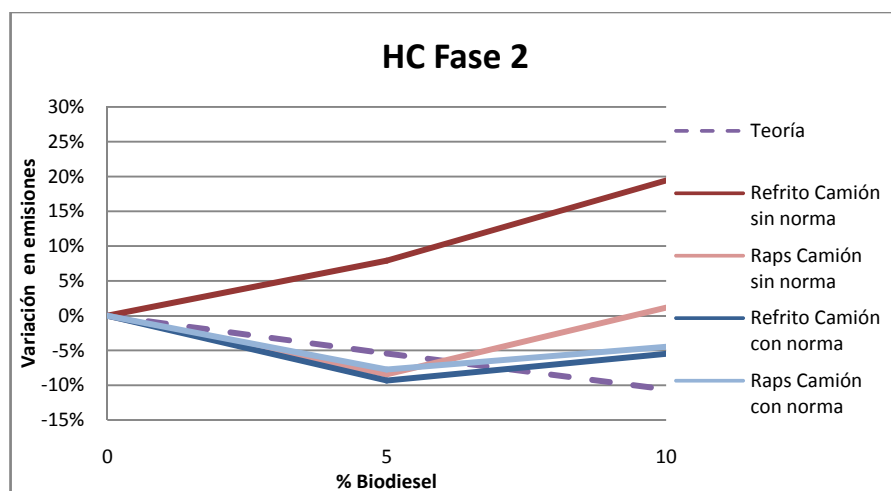


Fig. 5.3 Tendencias en las emisiones de HC, fase 2

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El camión sin norma presenta tendencias similares en ambas fases, mientras que el camión con norma presenta aumentos en la fase 1 y reducciones en la fase 2. Al igual que para el ciclo completo, no existen una tendencia clara en ninguno de los casos, debido a que los comportamientos para una mezcla con un 5% de biodiesel no se mantienen ni aumentan con un 10% de biodiesel.

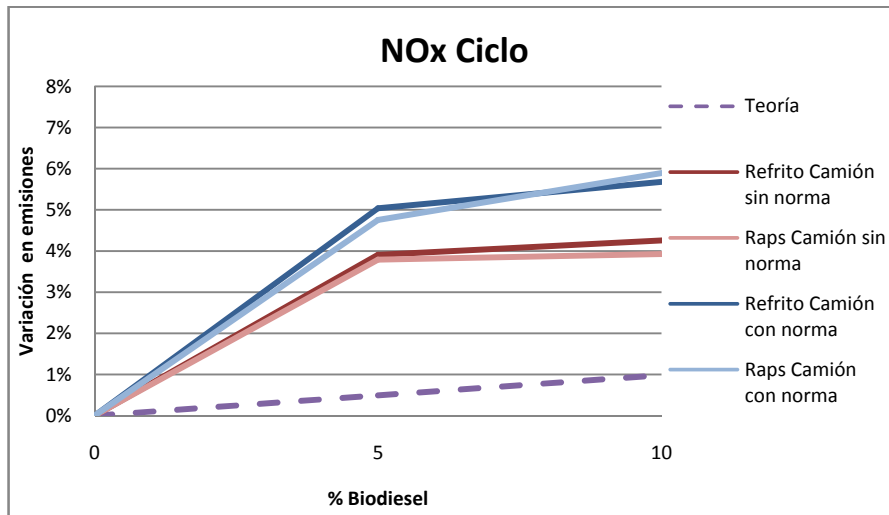


Fig. 5.4 Tendencias en las emisiones de NO<sub>x</sub>, ciclo completo

En términos de tendencias, en todos los casos las emisiones de NO<sub>x</sub> siguen lo esperado según la teoría, es decir aumentan, sin embargo en todos los casos el aumento es mayor que el reportado en la literatura consultada. Se observa al comparar entre los dos tipos de biodiesel que las emisiones con biodiesel de aceite refrito son levemente mayores a las emisiones con biodiesel de raps. Mientras que al comparar entre los dos tipos de camiones se observa que las emisiones del camión sin norma son mayores a las del camión con norma.

Si se desglosa el ciclo en las dos fases que lo conforman se obtienen los siguientes gráficos.

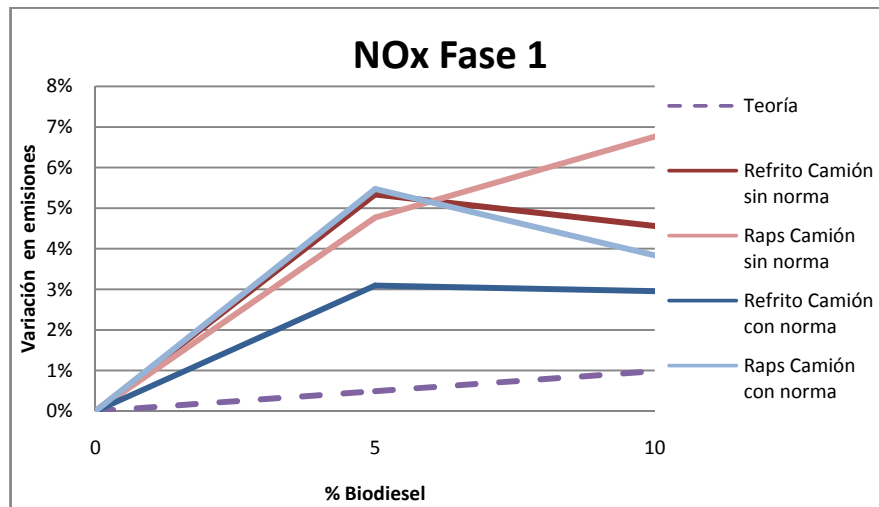


Fig. 5.5 Tendencias en las emisiones de NO<sub>x</sub>, fase 1

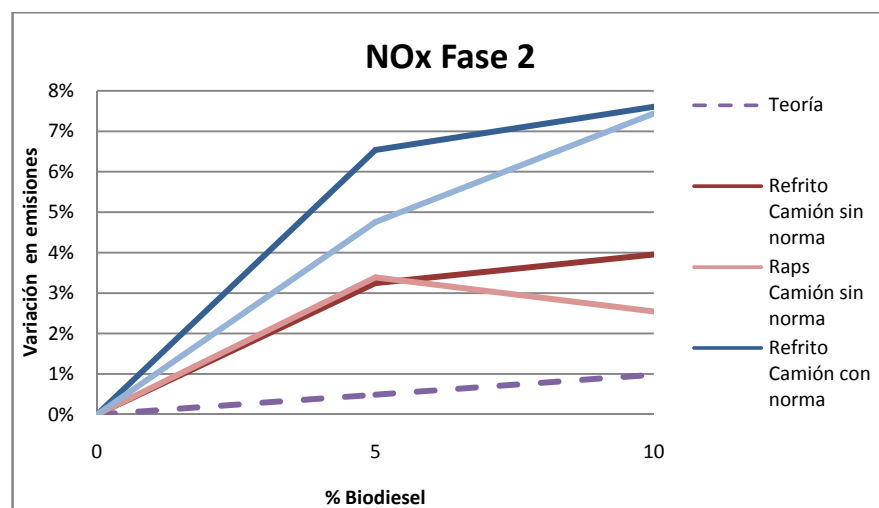


Fig. 5.6 Tendencias en las emisiones de NO<sub>x</sub>, fase 2

Nuevamente se observa que la fase 2 presenta tendencias más marcadas que la fase 1, aportando más fuertemente al comportamiento observado en el ciclo.



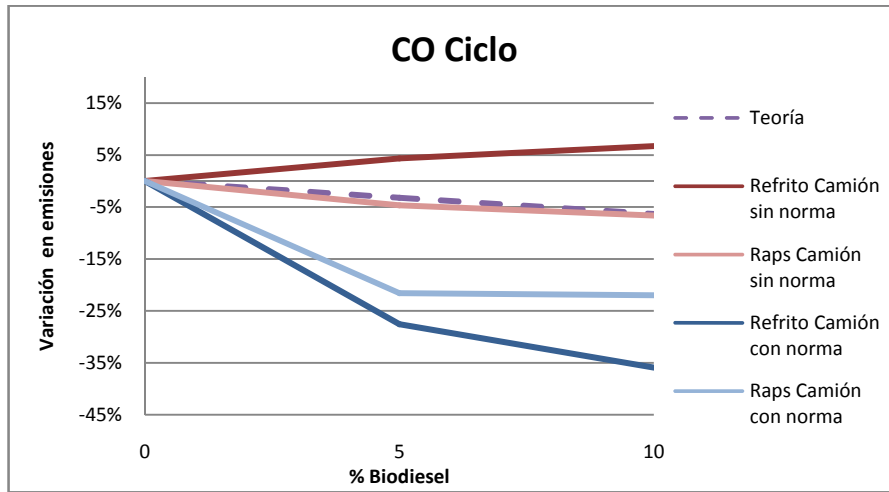


Fig. 5.7 Tendencias en las emisiones de CO, ciclo completo

Las emisiones de CO tienden a reducirse en todos los casos salvo para el camión sin norma con biodiesel de aceite refrito, para el cual las emisiones aumentan. En el camión con norma las emisiones son mayores a las esperadas a partir de la teoría, esto puede deberse en parte a que las emisiones de CO ya son altas para ese camión utilizando un diesel convencional, por lo que las reducciones se hacen más notorias. El camión sin norma con biodiesel de raps tiene un comportamiento muy similar al teórico. Al comparar entre los dos camiones se ve claramente que las emisiones del camión sin norma son mayores a las del camión con norma, mientras que si se compara entre los dos tipos de biodiesel se tiene que mientras para el camión sin norma las emisiones del biodiesel de aceite refrito son mayores que las emisiones del biodiesel de raps, para el camión con norma, de forma opuesta, las emisiones del biodiesel de raps son mayores que las emisiones del biodiesel de aceite refrito.

Si se desglosa el ciclo en las dos fases que lo conforman se obtienen los siguientes gráficos.

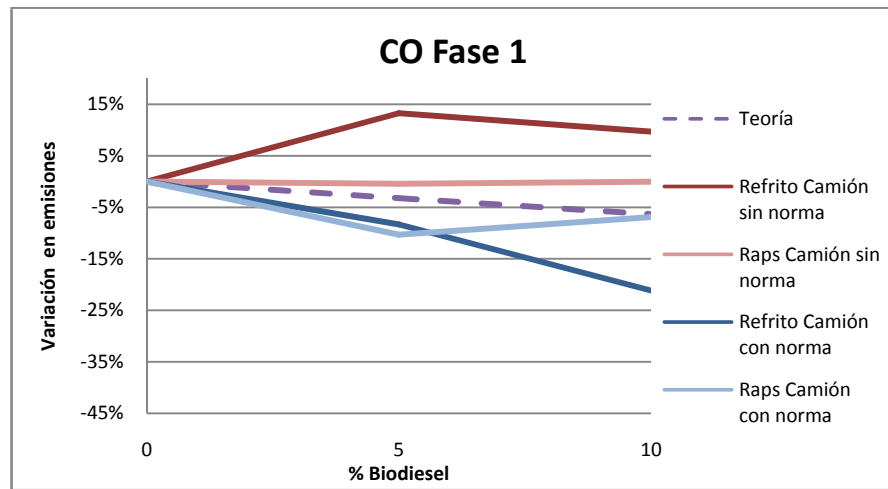


Fig. 5.8 Tendencias en las emisiones de CO, fase 1

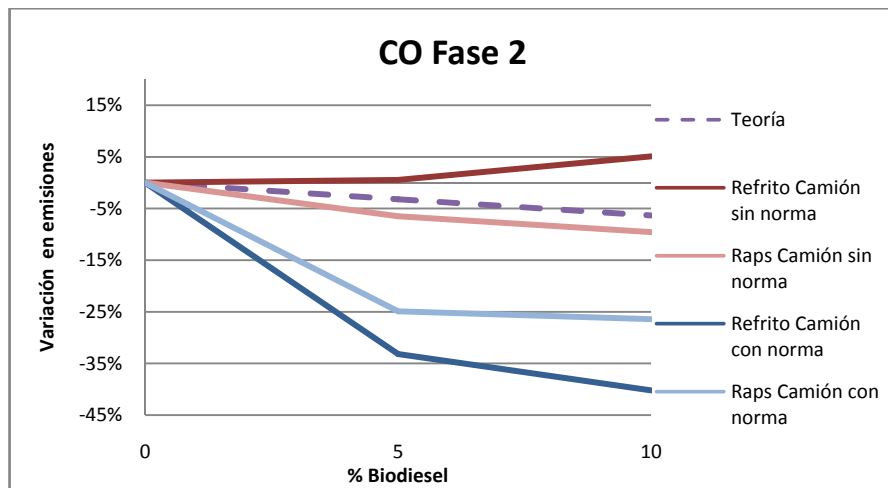


Fig. 5.9 Tendencias en las emisiones de CO, fase 2

Al igual que en los casos anteriores se tiene que la fase 2 presenta tendencias más marcadas y consecuentemente aportes mayores al comportamiento del ciclo completo.

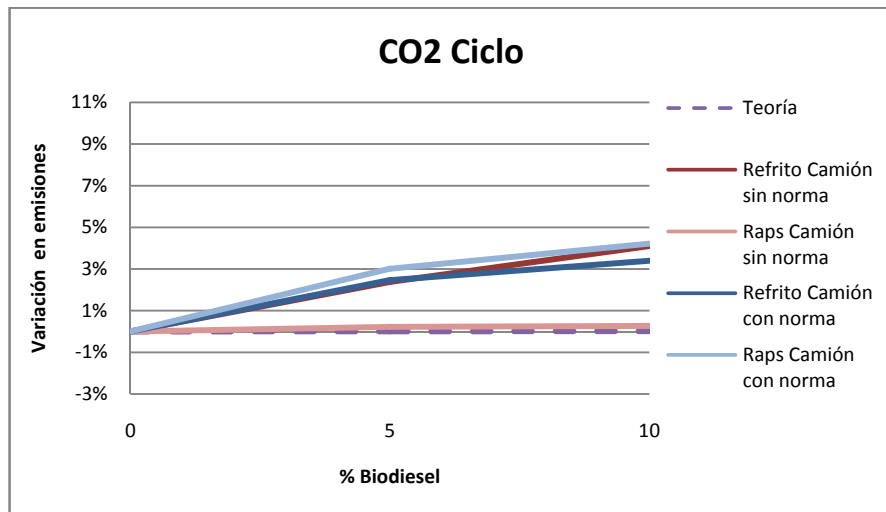


Fig. 5.10 Tendencias en las emisiones de CO<sub>2</sub>, ciclo completo

Nuevamente todos los casos siguen la misma tendencia a aumentar que la esperada según la teoría, pero en la mayoría de los casos este aumento en las emisiones es mayor al teórico. Así mismo, nuevamente el camión sin norma con biodiesel de raps es que tiene el comportamiento más similar al teórico.

Si se desglosa el ciclo en las dos fases que lo conforman se obtienen los siguientes gráficos.

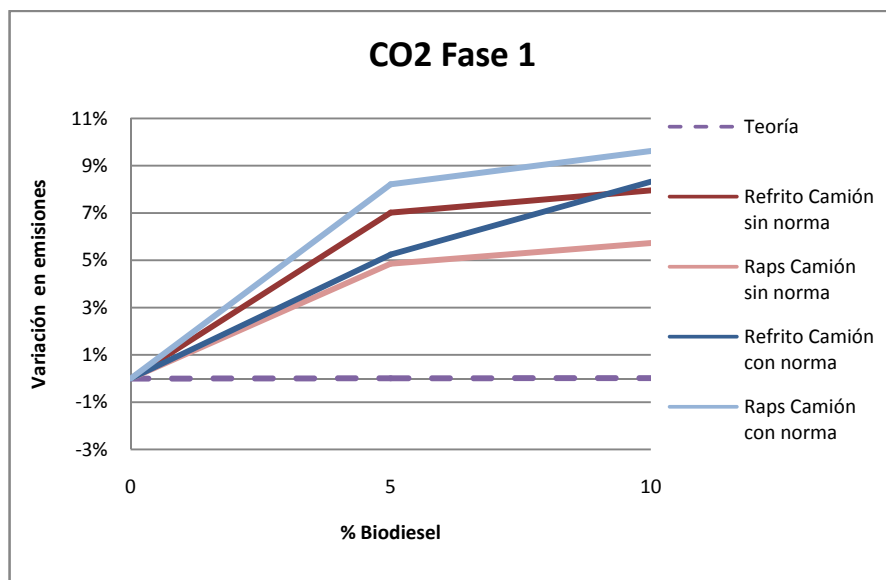


Fig. 5.11 Tendencias en las emisiones de CO<sub>2</sub>, fase 1

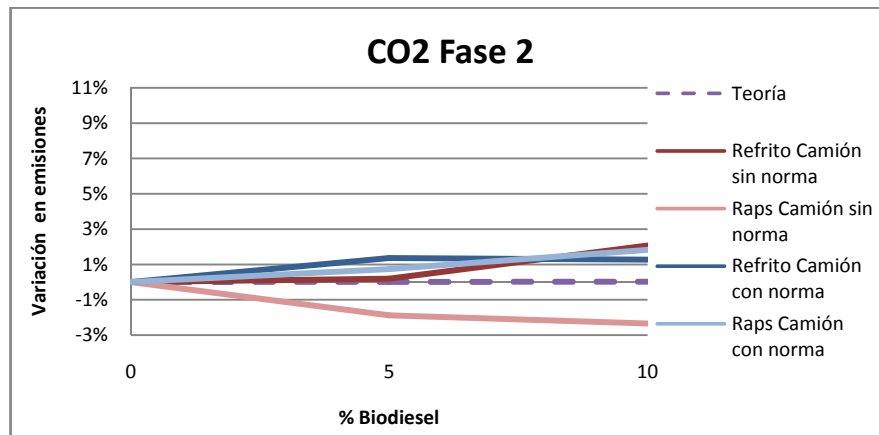


Fig. 5.12 Tendencias en las emisiones de CO<sub>2</sub>, fase 2

Se tiene que si bien la fase 1 presenta tendencias más marcadas, es en la fase 2 donde las emisiones se comportan de forma más similar a la esperada según la literatura revisada, siendo todas las variaciones menores para esta fase.

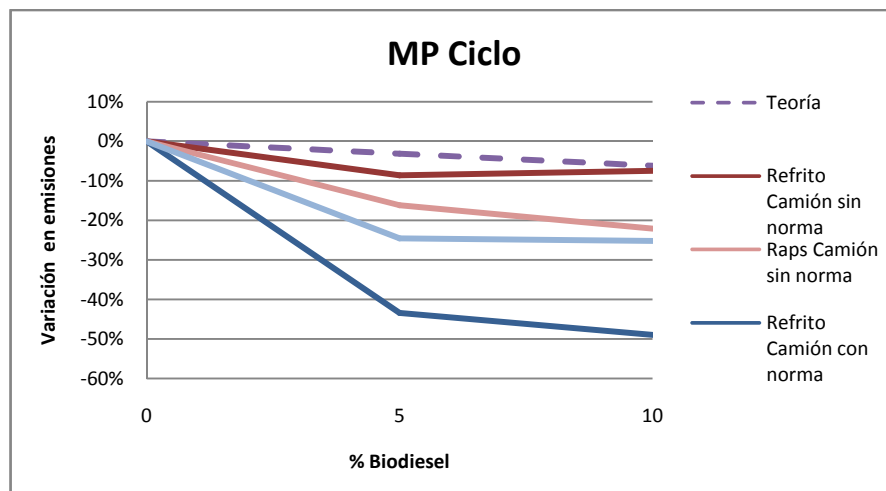


Fig. 5.13 Tendencias en las emisiones de MP, ciclo completo

Las emisiones de material particulado se reducen en todos los casos, tal como se esperaba según la teoría, pero en porcentajes mayores al esperado. Estas reducciones nuevamente son más drásticas en el caso del camión con norma, las razones pueden ser las mismas que en el caso del CO, es decir que dado que el camión presenta en general, para un combustible convencional, mayores emisiones de MP que un camión normal, las reducciones se hacen más notorias al utilizar biodiesel. Si se compara entre los distintos tipos de biodiesel nuevamente se tienen comportamientos distintos entre los dos camiones, pues

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

mientras para el camión sin norma las emisiones con biodiesel de aceite refrito son mayores que las emisiones del biodiesel de raps, para el camión con norma las emisiones del biodiesel de raps son mayores que las emisiones del biodiesel de aceite refrito.

Si se desglosa el ciclo en las dos fases que lo conforman se obtienen los siguientes gráficos.

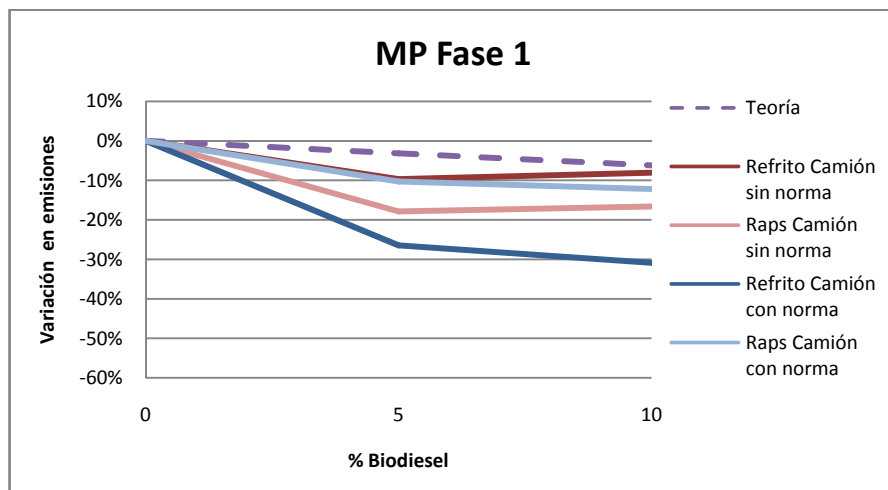


Fig. 5.14 Tendencias en las emisiones de MP, fase 1

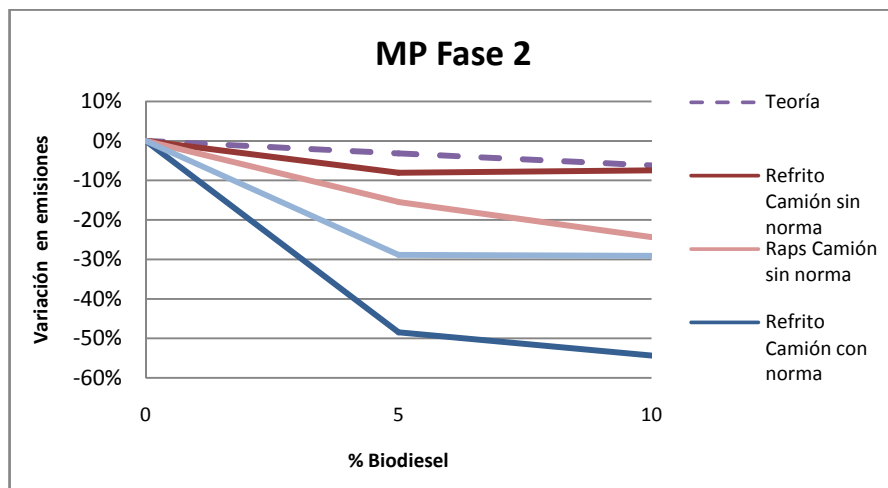


Fig. 5.15 Tendencias en las emisiones de MP, fase 2

Para ambas fases se mantiene la comparación tanto entre los camiones, siendo las emisiones del camión sin norma mayores a las del camión con norma, como entre los biodiesel, siendo mayores las emisiones del biodiesel de aceite refrito para el camión sin

norma y mayores las emisiones del biodiesel de raps para el camión con norma. Las dos fases presentan tendencias claras siendo estas más fuertes en la fase 2.

### 5.1.2 Análisis estadístico de las emisiones

Se realizó un test de hipótesis según lo detallado en el capítulo 3.2. Los resultados de las tendencias determinadas para los dos camiones se presentan en las siguientes tablas.

**Tabla 5.1 Resultados test de hipótesis para camión sin norma**

	Camión sin Norma			
	REFRITO		RAPS	
	5%	10%	5%	10%
HC	Aumenta	Aumenta	Reduce	-
NOx	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
CO	-	Aumenta	-	-
CO2	-	Aumenta	-	-
MP	Reduce	Reduce	Reduce	Reduce

**Tabla 5.2 Resultados test de hipótesis para camión con norma**

	Camión con Norma Euro II			
	REFRITO		RAPS	
	5%	10%	5%	10%
HC	-	-	-	-
NOx	Aumenta	Aumenta	-	Aumenta
CO	Reduce	Reduce	Reduce	Reduce
CO2	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
MP	Reduce	Reduce	Reduce	Reduce

Luego, es posible inferir a partir de los resultados obtenidos que las emisiones de material particulado se reducirán en todos los casos al utilizar biodiesel, con los dos tipos de camiones y con los dos tipos de biodiesel. Así mismo se tiene que en todos los casos se presenta un aumento en las emisiones de NO<sub>x</sub>. Las variaciones en las emisiones de otros contaminantes dependerán de la normativa del camión o del origen del biodiesel utilizado.

Resulta interesante revisar los resultados para un análisis estadístico de las mismas características aplicado a cada fase del ciclo. Las tendencias encontradas para la fase 1, urbana, se muestran en las siguientes tablas.

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

**Tabla 5.3 Resultados test de hipótesis para camión sin norma**

	Camión sin Norma – Fase 1			
	REFRITO		RAPS	
	5%	10%	5%	10%
HC	Aumenta	Aumenta	-	-
NOx	-	-	Aumenta	Aumenta
CO	-	Aumenta	-	-
CO2	Aumenta	-	-	Aumenta
MP	-	-	-	-

**Tabla 5.4 Resultados test de hipótesis para camión con norma**

	Camión con Norma Euro II – Fase 1			
	REFRITO		RAPS	
	5%	10%	5%	10%
HC	-	-	-	-
NOx	Aumenta	Aumenta	-	Aumenta
CO	Reduce	Reduce	Reduce	-
CO2	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
MP	Reduce	Reduce	-	-

Mientras que las tendencias encontradas para la fase 2, rural, se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 5.5 Resultados test de hipótesis para camión sin norma**

	Camión sin Norma – Fase 2			
	REFRITO		RAPS	
	5%	10%	5%	10%
HC	-	Aumenta	-	-
NOx	Aumenta	Aumenta	Aumenta	-
CO	-	-	-	-
CO2	-	-	-	Reduce
MP	-	-	Reduce	Reduce

**Tabla 5.6 Resultados test de hipótesis para camión con norma**

	Camión con Norma Euro II – Fase 2			
	REFRITO		RAPS	
	5%	10%	5%	10%
HC	-	-	-	-
NOx	Aumenta	Aumenta	-	Aumenta
CO	Reduce	Reduce	Reduce	Reduce
CO2	-	-	-	-
MP	Reduce	Reduce	Reduce	Reduce

A modo general se observa que todas las tendencias son más marcadas en la fase 2 por sobre la fase 1. Es posible establecer además que las variaciones con respecto al diesel son más claras para el camión con norma que para el camión sin norma. Finalmente, la revisión del comportamiento en las dos fases que conforman el ciclo permiten sostener las inferencias del análisis del ciclo completo. Para ambos camiones las emisiones de MP se reducen y las emisiones de  $\text{NO}_x$  aumentan, estas inferencias se mantienen debido a que si bien no todas las tablas presentan tales conclusiones, estas no se revierten en ningún caso. Por lo mismo se mantiene también la inferencia de que el CO se reduce para el camión con norma. De la misma forma, se observa que el  $\text{CO}_2$  y el HC no presentan un comportamiento claro, y son en varios casos distintos a los concluidos para el ciclo completo, por lo que no son concluyentes.

### 5.2 Efecto de las propiedades del biodiesel en las emisiones

#### 5.2.1 Revisión literaria

Con el fin de investigar las causas del comportamiento en las emisiones vehiculares al utilizar mezclas de biodiesel se ha llevado a cabo una revisión literaria, de modo de establecer las principales teorías que existen actualmente para explicar las razones de los cambios en las emisiones producidos. Para esto se revisaron cerca de 20 artículos publicados entre los años 1995 y 2007 que detallan distintas investigaciones sobre las emisiones en vehículos con biodiesel.

#### ***Emisiones de $\text{NO}_x$***

Dado que el  $\text{NO}_x$  corresponde al único contaminante que presenta aumentos significativos con el uso de biodiesel, ha sido el contaminante más estudiado por diversos autores, con el fin de determinar mecanismos que puedan aplacar estos aumentos en las emisiones. La razón más respaldada por la mayoría de los autores para explicar el aumento en las emisiones de  $\text{NO}_x$ , corresponde a que existe un adelanto en la inyección del combustible, a raíz del cual se produce la combustión en un punto más cercano al punto muerto superior, resultando una liberación prematura de calor y alcanzando finalmente mayores peaks de temperatura, lo cual, según se ha explicado en los antecedentes, genera mayores emisiones de  $\text{NO}_x$ .



## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Este adelanto en la inyección de combustible se produce debido al mayor módulo volumétrico del biodiesel, relacionado con la mayor densidad de este, lo cual se traduce en una mayor resistencia del líquido a la compresión, provocando que el aumento de presión en la bomba de inyección sea más rápido adelantando así la apertura de la aguja y por lo tanto la inyección de combustible a la cámara. Algunos autores [17] señalan que este adelanto se ve favorecido por otras propiedades, como la mayor velocidad de sonido del biodiesel, lo que permite que se propague más rápido a través de los inyectores; y la mayor viscosidad, lo cual reduce las fugas en la bomba permitiendo un mayor aumento en la presión.

Con el fin de sostener esta teoría, se han realizado diversos estudios para establecer la existencia de una relación entre las emisiones de  $\text{NO}_x$  y el módulo volumétrico, el tiempo de inyección o la densidad. Monyem et al [11] comparó tanto el efecto del contenido de oxígeno como el del comienzo de la inyección en las emisiones de  $\text{NO}_x$  mostrando que no hay diferencias estadísticamente significativas en las emisiones entre biodiesel con distintas cantidades de oxígeno. Mientras que, para el tiempo de inyección estándar las emisiones de biodiesel eran aproximadamente un 13% mayores que las emisiones del diesel, si se avanzaba la inyección en 3 grados el biodiesel causaba un aumento en un 11% en las emisiones y si se retrasaba la inyección el biodiesel causaba un aumento en 18% en las emisiones.

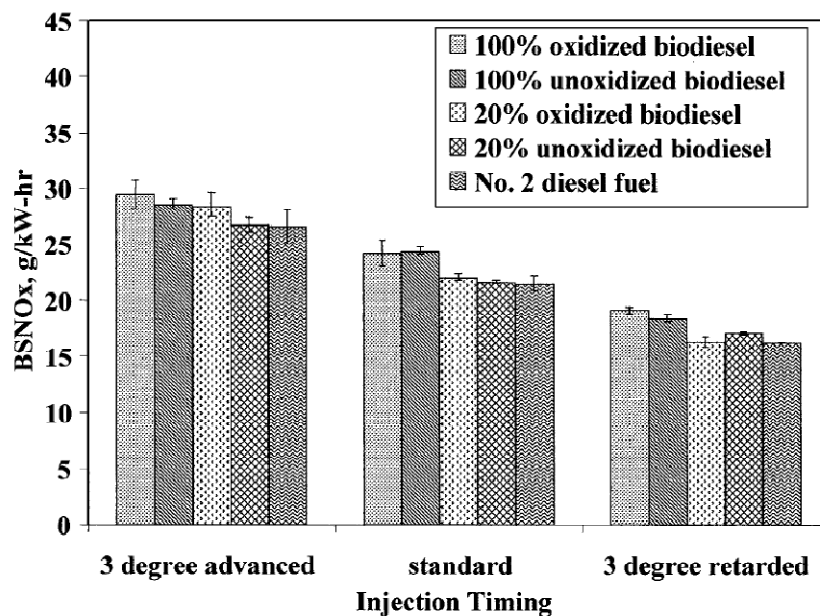


Fig. 5.16 Emisiones de  $\text{NO}_x$  para distintos tiempos de inyección [11]

Szybist et al [13] han mostrado que los valores de tiempo de inyección están en función del módulo volumétrico tanto a cargas altas como cargas bajas. Para todas las condiciones, el tiempo de comienzo de la inyección tiene una tendencia lineal con el módulo volumétrico.

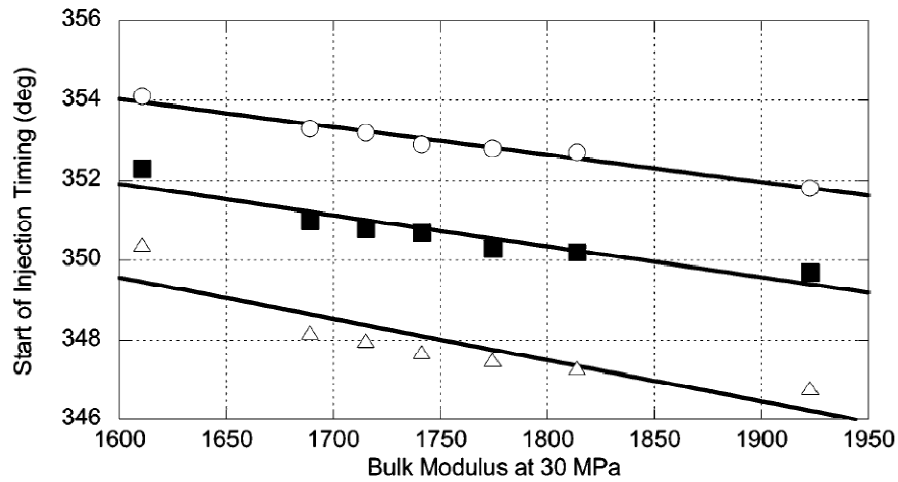


Fig. 5.17 Comienzo de la inyección en función del módulo volumétrico [13]

Dada la relación directa existente entre el módulo volumétrico y la densidad [14] se tiene que ambas propiedades deberían estar en relación con las emisiones de  $\text{NO}_x$ . La relación entre la densidad y las emisiones de  $\text{NO}_x$  fue estudiada por Graboski et al [7], confirmando la relación antes mencionada con una regresión lineal estadísticamente significativa

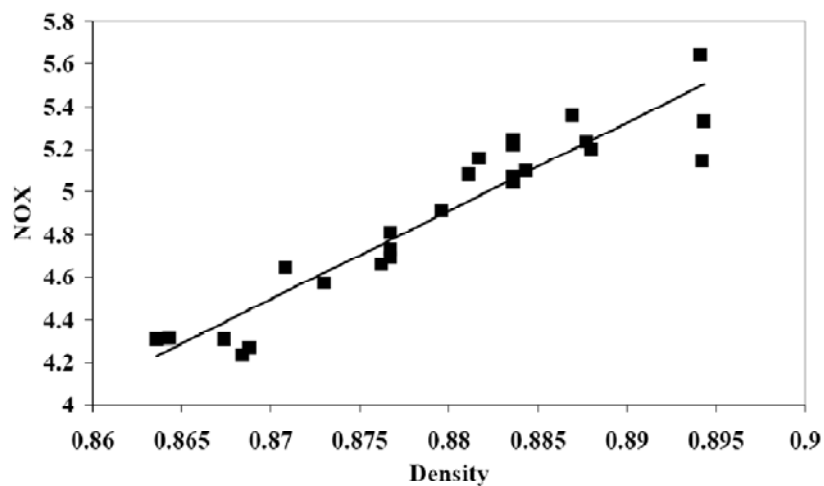


Fig. 5.18 Emisiones de  $\text{NO}_x$  en función de la densidad [7]

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de esta explicación para el aumento en las emisiones de  $\text{NO}_x$ , es razonable asumir que si modificamos el sistema de inyección para restaurar las condiciones de avance nominal, el fenómeno será eliminado o drásticamente reducido devolviendo los valores de emisiones de  $\text{NO}_x$  a valores comparables acorde al combustible utilizado.

Existen además estudios que investigan las diferencias en las emisiones de  $\text{NO}_x$  para combustibles biodiesel de distintas fuentes, concluyendo estos que las emisiones de  $\text{NO}_x$  son mayores con un mayor número de yodo, el número de yodo es una medida del grado de insaturación o número de enlaces dobles. En la figura se observa una relación altamente lineal entre el número de Yodo y las emisiones de  $\text{NO}_x$ . [7]

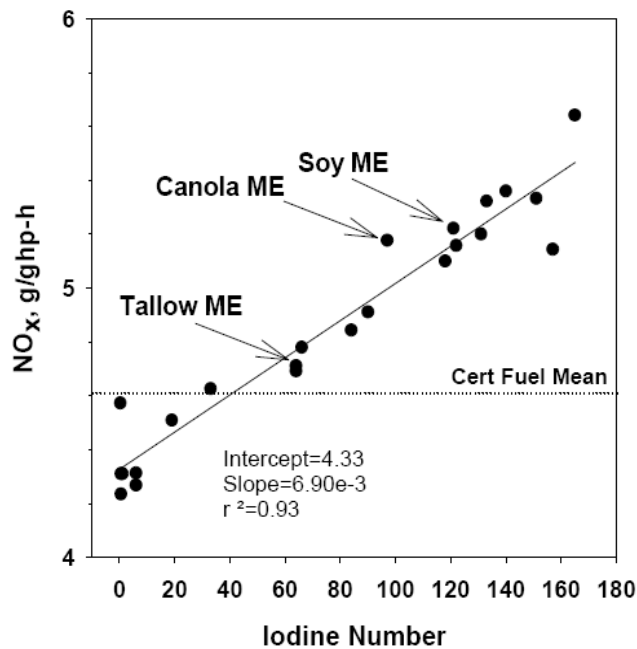


Fig. 5.19 Emisiones de  $\text{NO}_x$  en función del número de yodo [7]

La EPA, a partir de su revisión literaria [1], determinó una diferencia en las emisiones de  $\text{NO}_x$  entre combustibles biodiesel de distintas fuentes.

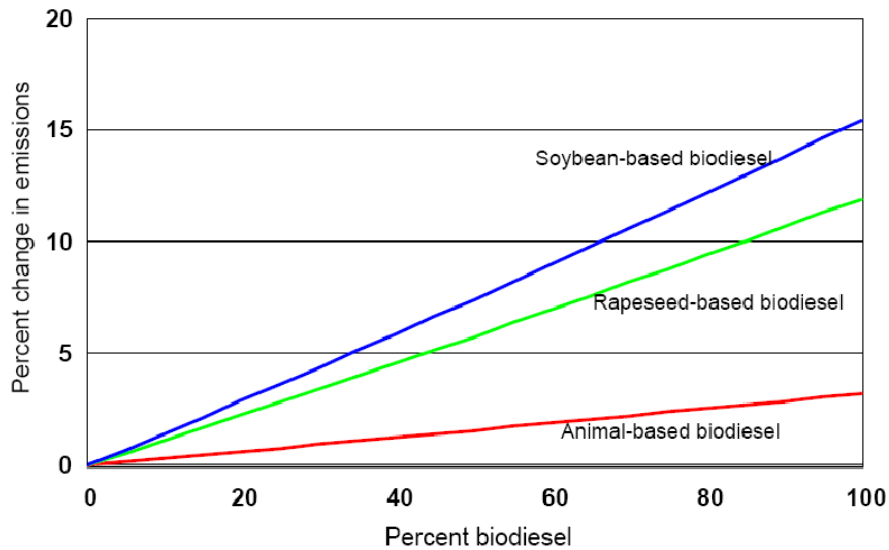


Fig. 5.20 Variación en las emisiones de NO<sub>x</sub> para biodiesel de distintas fuentes [1]

### ***Emisiones de MP***

Si bien existen diversas teorías para explicar la reducción en las emisiones de material particulado en un vehículo operando con biodiesel, la razón con mayor consenso se basa en el mayor contenido de oxígeno de la molécula de biodiesel. El oxígeno permite una combustión más completa incluso en las zonas localmente ricas, y promueve la oxidación del hollín ya formado. La formación de hollín, causada por la descomposición a altas temperaturas, toma lugar principalmente en las zonas ricas en combustibles a altas temperaturas y presiones, específicamente en las cercanías de cada atomizador. Si el combustible es parcialmente oxigenado, puede reducir localmente las regiones ricas en combustible y limitar así la formación de hollín, reduciendo luego las emisiones de MP [16][18]. Este comportamiento se ve potenciado por el menor punto de ebullición el cual garantiza la completa evaporación del combustible líquido [17].

Apoyando esta teoría se encuentran los estudios de Frijters [15], quien estudió la relación entre las emisiones de material particulado y el contenido de oxígeno del combustible utilizado.

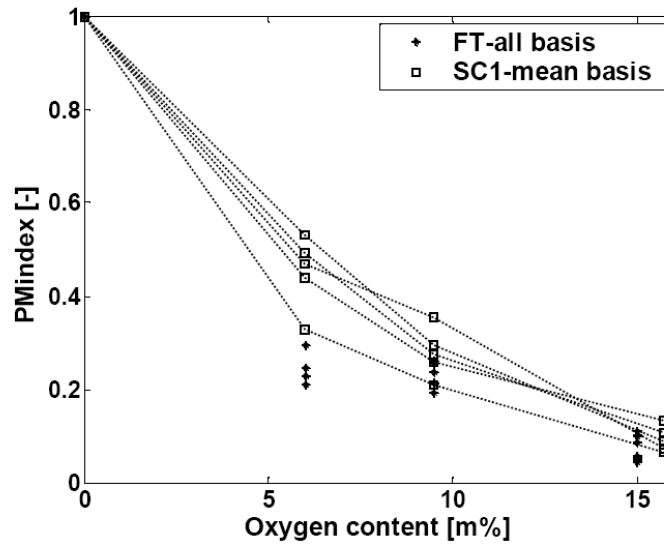


Fig. 5.21 Emisiones de material particulado en función del contenido de oxígeno [15]

Otra razón que afecta en menor grado a las emisiones de material particulado es el contenido de azufre, el cual contribuye a la producción de este. Ullman et al estudiaron el efecto de distintas propiedades sobre las emisiones con biodiesel, concluyendo que las propiedades que afectan las emisiones son el contenido de oxígeno y el contenido de azufre. Un aumento en un 1% en el contenido de oxígeno significa una disminución en un 6 a un 7% en las emisiones de MP, mientras que una reducción en 100 ppm en el contenido de azufre significa una reducción de un 3 a un 5% en las emisiones de MP [2]. Además el biodiesel no contiene aromáticos los cuales también contribuyen a la formación de MP.

Graboski et al [7] estudió el efecto de la química del combustible en las emisiones de MP, sin encontrar una relación entre las emisiones y alguna de las propiedades estudiadas (saturación, número de yodo o largo de la cadena de carbono). La EPA en su revisión literaria [1] ha determinado una diferencia entre las emisiones de MP de biodiesel proveniente de grasa animal y el biodiesel proveniente de aceites vegetales, pero no ha encontrado diferencias entre distintos aceites vegetales (soya, raps).

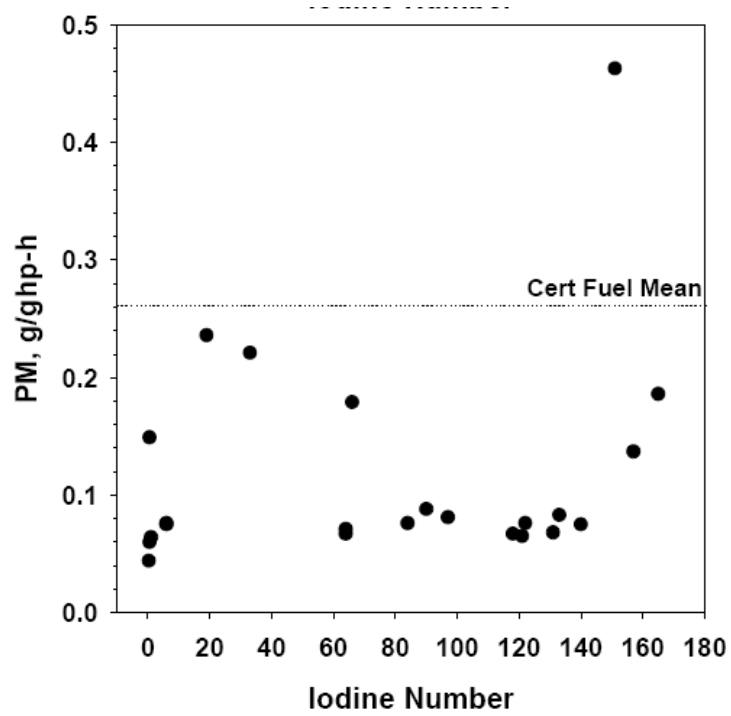


Fig. 5.22 Emisiones de MP en función del número de yodo [7]

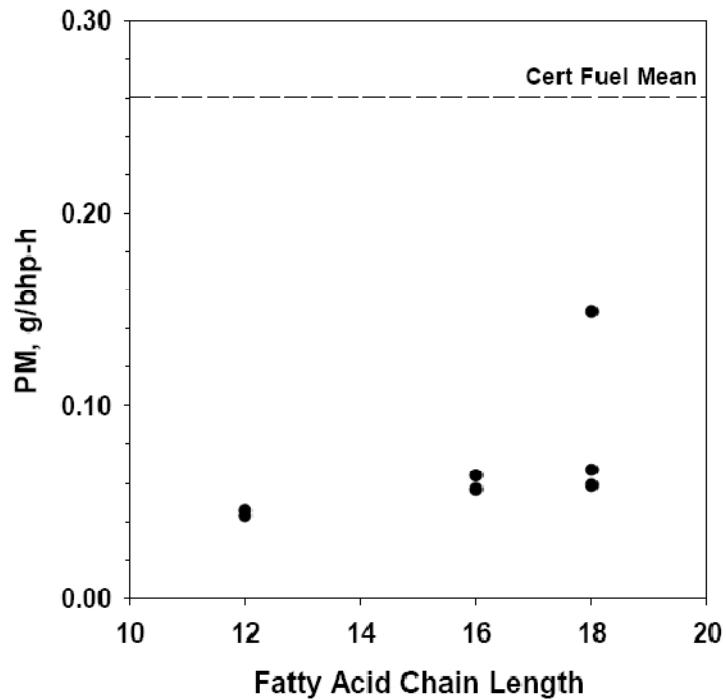


Fig. 5.23 Emisiones de MP para distintos largos de cadena de ácidos grasos [7]

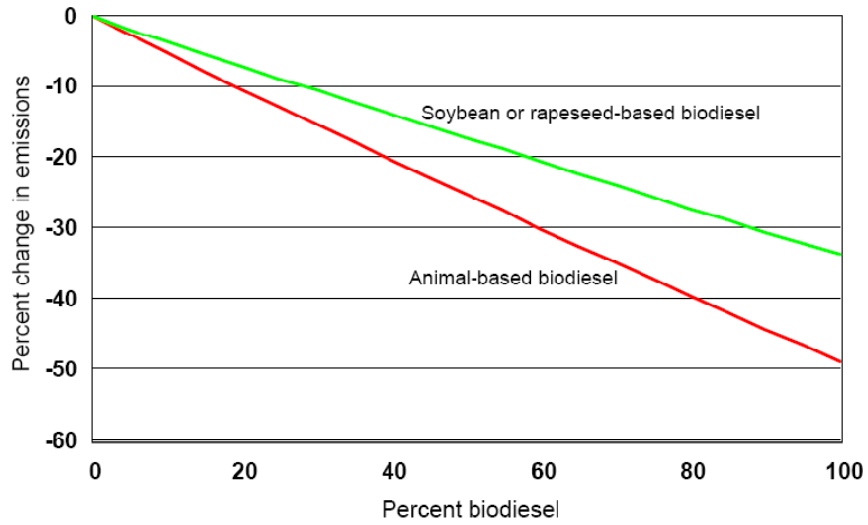


Fig. 5.24 Variaciones en las emisiones de MP para biodiesel de distintas fuentes [1]

### *Emisiones de CO*

Acorde a la mayoría de los autores, la principal razón en la reducción de los CO radica en el mayor contenido de oxígeno el cual permite mejorar la combustión. Monym [11] y Shi [19] estudiaron el efecto de contenido de oxígeno en las emisiones de CO, concluyendo que las emisiones de CO disminuyen a medida que aumenta el contenido de oxígeno.

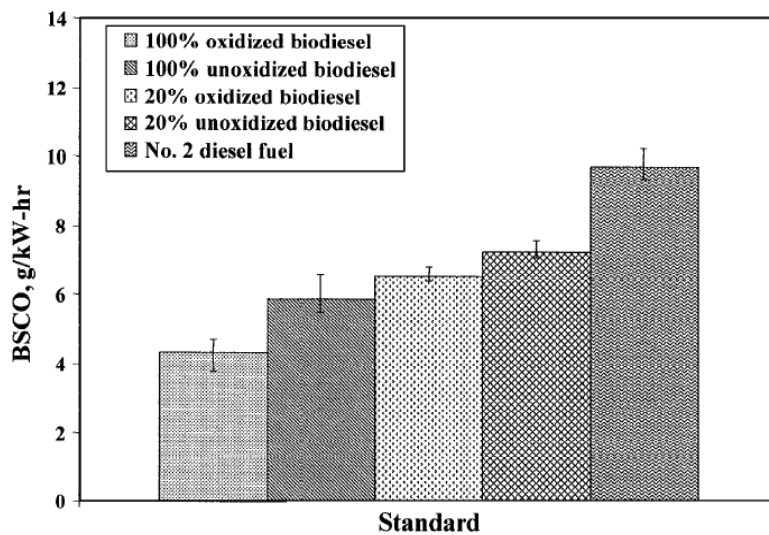


Fig. 5.25 Emisiones de CO para distintos contenidos de oxígeno [11]

También, algunos autores han explicado la reducción en las emisiones de CO por el mayor número de cetano, pues un mayor número de cetano disminuye la probabilidad de formación de zonas ricas en combustibles. Ullman et al estudió el efecto tanto del número de cetano como del contenido de oxígeno en las emisiones de CO encontrando una relación lineal con ambos parámetros[2].

Por su parte, la EPA a través de su revisión literaria [1], ha mostrado que la reducción en las emisiones de CO es mayor para biodiesel procedente de grasa animal, concluyendo que a medida que mayor es la saturación, menores serán las emisiones de CO.

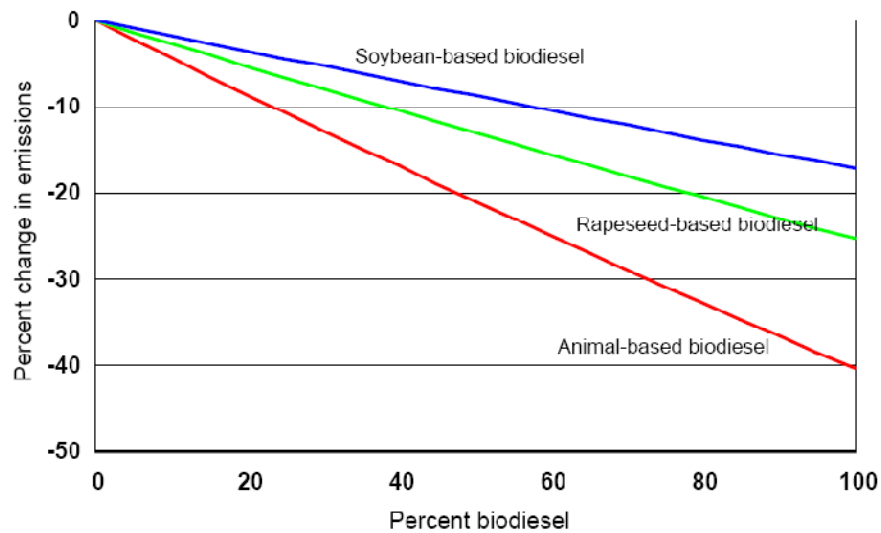


Fig. 5.26 Variaciones en las emisiones de CO para biodiesel de distintas fuentes [1]

### ***Emisiones de HC***

La mayoría de los autores han reportado reducciones en las emisiones de HC. Sin embargo algunos autores [25] han encontrado aumentos para bajos porcentajes de biodiesel y reducciones para altos porcentajes de biodiesel en la mezcla. En todos los casos han atribuido esto a que los valores de HC son muy bajos, cercanos a los límites inferiores de detección de emisiones, pudiendo esto provocar errores.

La principal razón para la reducción en las emisiones de HC, al igual que en el caso de CO, es el alto contenido de oxígeno, el cual permite una combustión más completa y limpia. También hay autores que explican el comportamiento por el alto número de cetano del



biodiesel, así mismo hay autores que explican las reducciones en los HC por ambos parámetros.

Monyem [11] en el estudio mencionado anteriormente, investigó el efecto del contenido de oxígeno en las emisiones de HC, obteniendo reducciones en los combustibles oxigenados. De forma similar a Monyem, Shi et al [19], ensayaron tanto biodiesel como biodiesel con etanol como oxigenado. Ambos autores explican las reducciones en las emisiones de HC, no sólo por el mayor contenido de oxígeno sino además por el mayor número de cetano de los oxigenados, el cual también favorece una mejor combustión.

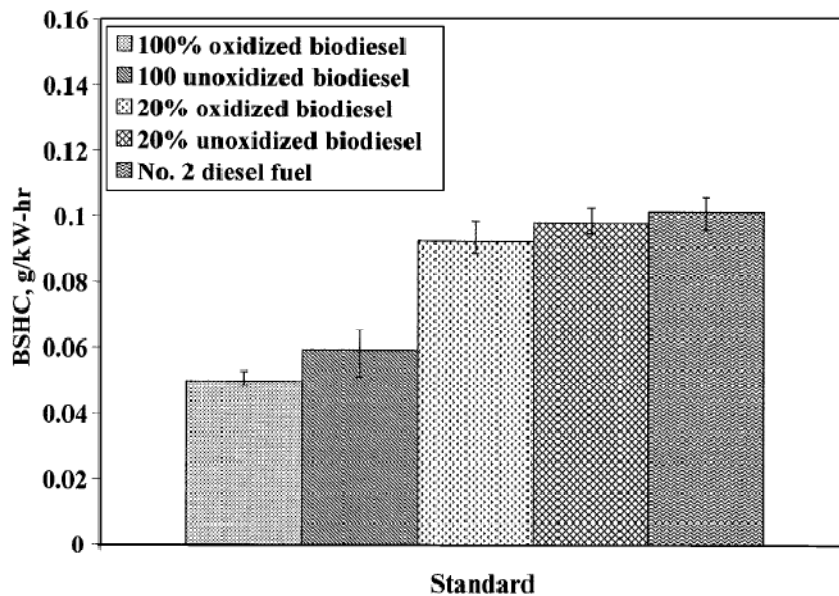


Fig. 5.27 Emisiones de HC para distintos contenidos de oxígeno [11]

Knothe [20] en su estudio concluye que las emisiones de HC y CO se ven afectadas por el largo de la cadena de carbón, reduciendo sus emisiones más a medida que mayor es el largo de la cadena. La EPA, en su estudio, no encontró diferencias significativas entre combustibles biodiesel de distintas fuentes.

### 5.2.2 Comparación con los resultados

La información de la revisión literaria desarrollada en la sección anterior será comparada con la información obtenida de los ensayos y propiedades de los combustibles, de modo de verificar las teorías acerca de las causas que explican el comportamiento de las emisiones de los contaminantes críticos al utilizar biodiesel, en relación a un combustible

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

diesel convencional. Para llevar a cabo esta comparación se presentan tablas que permiten comparar tanto las emisiones obtenidas con las encontradas en la literatura, como las propiedades químicas de los combustibles que, acorde a la literatura, explican las variaciones en las emisiones con las propiedades químicas encontradas en los combustibles ensayados, para las mezclas utilizadas de biodiesel.

### ***Emisiones de NO<sub>x</sub>***

Acorde a la literatura se espera un aumento leve en las emisiones de NO<sub>x</sub> causado principalmente por las propiedades físicas del biodiesel tales como mayor densidad y mayor viscosidad. Así mismo se espera que el aumento sea mayor a medida que mayor será el índice de yodo del biodiesel utilizado. En los ensayos realizados, en efecto aumentan las emisiones de NO<sub>x</sub>, de forma significativa estadísticamente, y acorde a la teoría se tiene que tanto la densidad como la viscosidad son mayores en los dos biodiesel utilizados comparado con el diesel convencional. Adicionalmente se tiene que el número de Yodo y la densidad del biodiesel de aceite refrito son mayores que en el caso del biodiesel de raps, siendo, efectivamente y coherente con la teoría, mayores sus emisiones. Estas afirmaciones se muestran en la siguiente tabla comparativa.

Camión	Mezcla	Fase Ciclo	Literatura	Raps	A. Refrito	Causa	Literatura	Raps	A. Refrito
Camión S/N	B5	Ciclo	↗	↗	↗	Densidad	0,842	0,8441	0,8445
		Fase 1	↗	↗	↑	Viscosidad	3,19	3,27	3,37
		Fase 2	↗	↗	↗	I. Yodo		91	98
	B10	Ciclo	↗	↗	↗	Densidad	0,842	0,8461	0,8469
		Fase 1	↗	↑	↗	Viscosidad	3,19	3,35	3,56
		Fase 2	↗	↗	↗	I. Yodo		91	98
Camión C/N	B5	Ciclo	↗	↗	↑	Densidad	0,842	0,8441	0,8445
		Fase 1	↗	↑	↗	Viscosidad	3,19	3,27	3,37
		Fase 2	↗	↗	↑	I. Yodo		91	98
	B10	Ciclo	↗	↑	↑	Densidad	0,842	0,8461	0,8469
		Fase 1	↗	↗	↗	Viscosidad	3,19	3,35	3,56
		Fase 2	↗	↑	↑	I. Yodo		91	98

### ***Emisiones de MP***

Según las teorías desarrolladas en la literatura revisada, las reducciones esperadas en las emisiones de material particulado se deben al mayor contenido de oxígeno presente en la molécula de biodiesel y en parte al menor contenido de azufre de la misma. Esta reducción no debería variar considerablemente entre dos biodiesel de procedencia vegetal. Se obtiene

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

de los ensayos que las emisiones de material particulado disminuyen, y si bien realizó un análisis que permitiera conocer las propiedades moleculares de los biodiesel ensayaron, se tiene que el biodiesel de raps y el de aceite refrito tienen en sus moléculas porcentajes similares de oxígeno, así mismo ambos combustibles tienen muy bajo contenido de azufre, concordando con la teoría, como se puede corroborar en la siguiente tabla.

Camión	Mezcla	Fase Ciclo	Literatura	Raps	A. Refrito	Causa	Literatura	Raps	A. Refrito
Camión S/N	B5	Ciclo	↓	↓	↓	Cont. O	0%	0,54%	0,55%
		Fase 1	↓	↓	↓	Azufre	22	21,3	21
		Fase 2	↓	↓	↓				
	B10	Ciclo	↓	↓	↓	Cont. O	0%	1,08%	1,10%
		Fase 1	↓	↓	↓	Azufre	22	20,5	19,9
		Fase 2	↓	↓	↓				
Camión C/N	B5	Ciclo	↓	↓	↓	Cont. O	0%	0,54%	0,55%
		Fase 1	↓	↓	↓	Azufre	22	21,3	21
		Fase 2	↓	↓	↓				
	B10	Ciclo	↓	↓	↓	Cont. O	0%	1,08%	1,10%
		Fase 1	↓	↓	↓	Azufre	22	20,5	19,9
		Fase 2	↓	↓	↓				

### ***Emisiones de CO***

A partir de la revisión literaria se infiere que el CO se reduce al utilizar biodiesel con respecto al diesel, explicándose esta reducción por el mayor contenido de oxígeno del biodiesel y en parte por el mayor número de cetano del biodiesel. Esta reducción se espera que sea mayor a medida que mayor es la saturación del combustible, es decir a medida que aumenta el número de yodo. La teoría se cumple únicamente en los ensayos realizados en el camión con norma y no para el camión sin norma, el cual si bien no presenta aumentos en las emisiones de CO, acorde al análisis estadístico, no presenta una tendencia clara. Para los biodiesel ensayados, tal como se ha mencionado anteriormente, el contenido de oxígeno que debiese tener la molécula, acorde a la procedencia de estos, es importante, y se tiene además que ambos combustibles presentan un mayor número de cetano que el del diesel convencional. Esta información se presenta en la siguiente tabla.

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Camión	Mezcla	Fase Ciclo	Literatura	Raps	A. Refrito	Causa	Literatura	Raps	A. Refrito
Camión S/N	B5	Ciclo	↘	↘	↗	Cont. O	0%	0,54%	0,55%
		Fase 1	↘	↘	↗	Cetano	51	51,3	51,5
		Fase 2	↘	↓	↗	I. Yodo		91	98
	B10	Ciclo	↓	↓	↗	Cont. O	0%	1,08%	1,10%
		Fase 1	↓	↘	↗	Cetano	51	51,6	52
		Fase 2	↓	↓	↗	I. Yodo		91	98
Camión C/N	B5	Ciclo	↘	↓	↓	Cont. O	0%	0,54%	0,55%
		Fase 1	↘	↓	↓	Cetano	51	51,3	51,5
		Fase 2	↘	↓	↓	I. Yodo		91	98
	B10	Ciclo	↓	↓	↓	Cont. O	0%	1,08%	1,10%
		Fase 1	↓	↓	↓	Cetano	51	51,6	52
		Fase 2	↓	↓	↓	I. Yodo		91	98

### *Emisiones de HC*

Por lo general en la literatura se tiene que las emisiones de HC son muy bajas, en muchos casos cercanas a los límites de los instrumentos utilizados, por lo que si bien se espera en la mayoría de los casos una importante reducción en las emisiones de HC, existen casos donde el HC no varía o incluso aumenta. La reducción esperada en los HC se explica, al igual que los casos anteriores por el mayor contenido de oxígeno presente en el biodiesel, y según algunos autores también por el mayor índice de cetano. No existen en la literatura revisada consenso acerca de variaciones en el comportamiento al variar el origen o las propiedades del biodiesel. Acorde a los ensayos realizados no se tiene tendencia clara respecto a las emisiones de HC al utilizar biodiesel, esto puede explicarse por lo bajo de sus valores.

Camión	Mezcla	Fase Ciclo	Literatura	Raps	A. Refrito	Causa	Literatura	Raps	A. Refrito
Camión S/N	B5	Ciclo	↓	↓	↗	Cont. O	0%	0,54%	0,55%
		Fase 1	↓	↓	↗	Cetano	51	51,3	51,5
		Fase 2	↓	↓	↗				
	B10	Ciclo	↓	↗	↗	Cont. O	0%	1,08%	1,10%
		Fase 1	↓	↗	↗	Cetano	51	51,6	52
		Fase 2	↓	↗	↗				
Camión C/N	B5	Ciclo	↓	↗	↗	Cont. O	0%	0,54%	0,55%
		Fase 1	↓	↗	↗	Cetano	51	51,3	51,5
		Fase 2	↓	↓	↓				
	B10	Ciclo	↓	↗	↗	Cont. O	0%	1,08%	1,10%
		Fase 1	↓	↗	↗	Cetano	51	51,6	52
		Fase 2	↓	↘	↓				

## Capítulo 6 Conclusiones

---

Se realizaron ensayos en 2 camiones con dos tipos de biodiesel y con diesel convencional, con el fin de medir los niveles de los cinco contaminantes críticos: hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO), material particulado respirable ( $\text{MP}_{10}$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A partir de los datos de las emisiones se cuantificaron en términos porcentuales las variaciones en las emisiones en los camiones con biodiesel con respecto a los camiones con diesel. Esta información se utilizó para hacer una serie de análisis de modo de determinar tanto el efecto el uso de biodiesel en un vehículo pesado sobre sus emisiones como la relación entre estas y el tipo de biodiesel utilizado, el tipo de camión ensayado, el porcentaje en la mezcla de combustible y la fase del ciclo de conducción desarrollado. Finalmente se han estudiado las propiedades que afectan las emisiones en un vehículo con biodiesel, provocando variaciones en estas con respecto a un vehículo de diesel.

La utilización de biodiesel, en ambos camiones ensayados y para los dos tipos de biodiesel utilizados, ha provocado una reducción en las emisiones de material particulado y un aumento en las emisiones de  $\text{NO}_x$ . La primera se explicaría por el mayor contenido de oxígeno presente en la molécula de biodiesel el cual previene la formación de zonas ricas en combustibles y disminuyendo de esta forma la formación de hollín, además de promover la oxidación del mismo, disminuyendo de esta forma la generación de particulados. Una causa secundaria para la reducción en las emisiones corresponde a la drástica disminución en el contenido de azufre del biodiesel con respecto a un diesel convencional, el cual es un importante promotor en la formación de material particulado.

El aumento en las emisiones de  $\text{NO}_x$  radica principalmente en la mayor densidad del biodiesel, la cual concibe un aumento en el módulo volumétrico, es decir, una mayor resistencia a la compresión del líquido. Esta menor capacidad del líquido para comprimirse se traduce en un aumento más rápido de la presión en la bomba del inyector, lo cual adelanta

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

la apertura de la aguja del mismo, este adelanto en la inyección del combustible, permite que se alcancen mayores peaks de temperatura durante la combustión, aumentando por lo tanto las emisiones de  $\text{NO}_x$ , fuertemente relacionadas con la temperatura. Luego, puede contrarrestarse el aumento en las emisiones de  $\text{NO}_x$  modificando el tiempo de inyección de combustible adaptándolo a las condiciones del biodiesel, de modo de volverla a su tiempo nominal.

Las emisiones de CO han disminuido únicamente para el camión con norma, el cual presentó a su vez emisiones mayores de CO, para todos los combustibles, que camiones de similares características ensayados para investigaciones anteriores. Pese a lo anterior, fue posible observar un comportamiento claro del CO al utilizar biodiesel en este camión, el cual tuvo siempre una tendencia a la reducción. Estas variaciones en las emisiones del CO se explican en parte por el contenido de oxígeno en la molécula de biodiesel, el cual permite una combustión más completa evitando así la formación de CO.

Tanto las emisiones de HC como las de  $\text{CO}_2$ , no mostraron tendencias claras, por lo cual no se presentan conclusiones respecto a su comportamiento. La falta de tendencia en el caso de HC se puede explicar por lo bajo de sus niveles medidos en las emisiones, niveles generalmente muy cercanos a los límites inferiores del rango de medición de los instrumentos, lo cual puede generar errores en estas mediciones. Por su parte, el  $\text{CO}_2$  si bien presentó aumentos estos son muy leves, por lo cual no se consideraron significativos en términos estadísticos. Este aumento muy leve se repite en la literatura revisada.

Para los tres contaminantes con tendencias concluyentes se tiene que hay una diferencia entre las emisiones del camión con norma y las emisiones del camión sin norma, siendo en todos los casos las variaciones, respecto al combustible diesel, mayores para el camión con norma que para el camión sin norma. Es decir, el camión con norma tuvo una mayor sensibilidad a la utilización de biodiesel que el camión sin norma.

El origen del biodiesel utilizado, raps o aceite refrito, afectó únicamente las emisiones de  $\text{NO}_x$ , siendo levemente mayores las emisiones de biodiesel de aceite refrito, para ambos camiones. Mientras que tanto las emisiones de CO como las de MP, eran en un caso mayores para el biodiesel de aceite refrito y en otro caso mayores para el biodiesel de raps. Esto se debe a que las emisiones de  $\text{NO}_x$ , como se ha explicado anteriormente, son sensibles a la densidad y además eran sensibles al número de Yodo del biodiesel, propiedades que eran

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

claramente distintas entre los dos biocombustibles; mientras que las emisiones de CO y MP son sensibles principalmente al contenido de oxígeno y en parte al número de cetano, propiedades que eran similares entre ambos biocombustibles.

Al desglosar el ciclo en las dos fases que lo conforman se tiene que la fase 2 presenta en todos los casos tendencias más claras, es decir congruentes al aumento de biodiesel en la mezcla, que la fase 1. La fase 1 contiene más partidas, detenciones y ralentí, mientras que la fase 2 contiene una aceleración abrupta seguida de una velocidad más constante y mayor que la de la fase 1. Además la fase 1, en la mayoría de los ensayos, ha presentado valores de la desviación estándar mayores a los de la fase 2. Luego, las conclusiones obtenidas de la presente investigación pueden aplicarse con mayor certeza a un ciclo de conducción rural, con una velocidad poco variable que a un ciclo de conducción urbano, con reiteradas variaciones.

Siendo la principal motivación de la investigación desarrollada, la necesidad de establecer políticas en torno a la utilización del biodiesel en vehículos pesados, se concluye que es posible utilizar una mezcla de diesel hasta con un 10% de biodiesel, teniendo únicamente efectos negativos en las emisiones de NO<sub>x</sub>, los cuales pueden ser tratados modificando el tiempo de inyección; con efectos positivos en las emisiones de material particulado y en algunos casos en las emisiones de CO; y sin efectos importantes en el resto de los contaminantes. Se recomienda, de todas formas, establecer normas que aseguren el uso de un biodiesel correctamente procesado de forma de evitar problemas asociados a un proceso deficiente de transesterificación. Finalmente se da hincapié en la necesidad de fomentar el desarrollo y la investigación de biodiesel procedente de otras fuentes, además de las aquí estudiadas, tales como algas, jatropha y grasa animal; las cuáles tienen el beneficio adicional de no utilizar suelos agrícolas y por lo tanto no competir con el mercado de los alimentos.

## Capítulo 7 Bibliografía

---

- [1] ENVIROMENTAL PROYECTION AGENCY, EPA. 2002. *A comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions.*
- [2] LAPUERTA, M. et al. 2007. *Effect of biodiesel fuel son diesel engine emissions.* Elsevier.
- [3] U.S.DEPARTMENT OF ENERGY. 2006. *Biodiesel handling and using guidelines.*
- [4] DAGOBERT, P. 1995. *Automobiles and Polution.* Society of Automotive Engineers, SAE.
- [5] MCCORMICK, R. et al. 2001. *Impact of Biodiesel source material and chemical structure on emissions of criteria pollutants from heavy-duty engine.* American Chemical Society.
- [6] LEE, R. et al. 1998. *Fuel quality impact on heavy duty diesel emissions: A literature review.* SAE International.
- [7] GRABOSKY, M.S. et al. 2003. *The effect of biodiesel composition on engine emissions from a ddc series 60 diesel engine.* National Renewable Energy Laboratory.
- [8] MCCORMICK, R. Et al. 2006. *Effects of biodiesel blends on vehicle emissions.* National Renewable Energy Laboratory.
- [9] FLORES M., FRANCISC.O 2004. *Análisis ambiental y de costos asociados al uso de biodiesel como combustible para buses urbanos en Santiago.* Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.



## CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

- [10] CARDONE, M. Et al. 2002. *Brassica carinata as an Alternative Oil Crop for the Production of Biodiesel in Italy: Engine Performance and Regulated and Unregulated Exhaust Emissions*. American Chemical Society.
- [11] MONYEM, A. Et al. 2000. *The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions*. Elsevier
- [12] TAT, MUSTAFA. 2003. *Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines*. Iowa State University.
- [13] SZYBIST, J. Et al. 2005. *NO<sub>x</sub> Emissions of Alternative Diesel Fuels: A Comparative Analysis of Biodiesel and FT Diesel*. American Chemical Society.
- [14] BOEHMAN, A. Et al. 2004. *The Impact of the Bulk Modulus of Diesel Fuels on Fuel Injection Timing*. American Chemical Society.
- [15] FRIJTERS, P. Et al. 2004. *Oxygenated fuels for clean heavy duty diesel engines*. Proceedings of VAFSEP2004.
- [16] WANG, W. Et al. 2000. *Emissions from Nine Heavy Trucks Fueled by Diesel and Biodiesel Blend without Engine Modification*. American Chemical Society.
- [17] LAPUERTA, M. Et al. 2002. *Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils*. Society of Automotive Engineers, SAE.
- [18] HAAS, M. Et al. 2001. *Engine performance of biodiesel fuel prepared from soybean soapstock: a high quality renewable fuel produced from a waste feedstock*. Energy fuels.
- [19] SHI, X. Et al. 2005. *Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine*. Elsevier.
- [20] KNOTHE, G. Et al. 2005. *Exhaust Emissions of Biodiesel, Petrodiesel, Neat Methyl Esters, and Alkanes in a New Technology Engine*. American Chemical Society.

## CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

- [21] RAKOPOULOS, C. *Et al.* 2007. *Performance and emissions of bus engine using blends of diesel fuel with bio-diesel of sunflower or cottonseed oils derived from Greek feedstock.* Elsevier.
- [22] PINTO, A. *Et al.* 2005. *Biodiesel: An overview.* Sociedade Brasileira de Química.
- [23] SISON, K. *Et al.* 2006. *Soot generation of diesel fuels with substantial amounts of oxygen-bearing compounds added.* Elsevier.
- [24] SONG, J. *Et al.* 2004. *Comparison of the Impact of Intake Oxygen Enrichment and Fuel Oxygenation on Diesel Combustion and Emissions.* American Chemical Society.
- [25] TURRIO, L. *Et al.* 2003. *Emission comparison of urban bus engine fueled with diesel oil and 'biodiesel' blend.* Elsevier.
- [26] CANAKCI, M & VAN GERPEN, J. 2001. *Comparison of Engine Performance and Emissions for Petroleum Diesel Fuel, Yellow Grease Biodiesel, and Soybean Oil Biodiesel.* 2001 ASAE Annual International Meeting.

## Capítulo 8 ANEXOS

---

### 8.1 ANEXO A

#### 8.1.1 Descripción del laboratorio.

Las mediciones de emisiones de la flota experimental en estudio se realizaron en el Laboratorio de Vehículos Pesados del 3CV. El laboratorio de Vehículos cuenta con el siguiente equipamiento:

##### ***Dinamómetro de Chasis.***

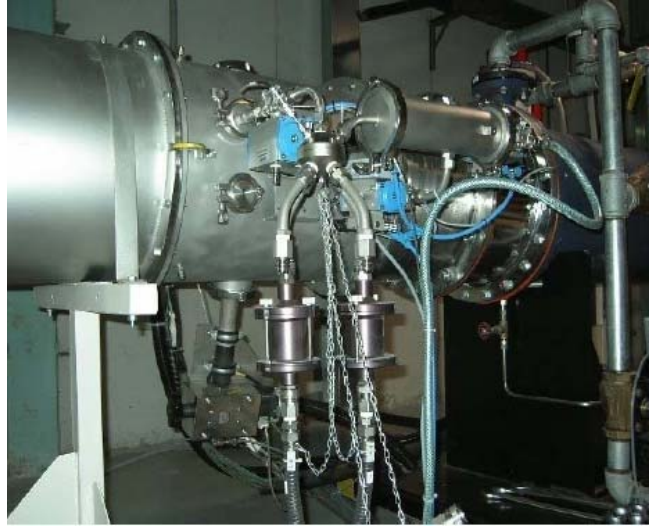
Dinamómetro eléctrico marca AVL-Zöllner, con rodillo simple de 48 pulgadas. La capacidad de inercia máxima es de 30 [ton] y su potencia máxima de 300 [kW].



##### ***Túnel de dilución***

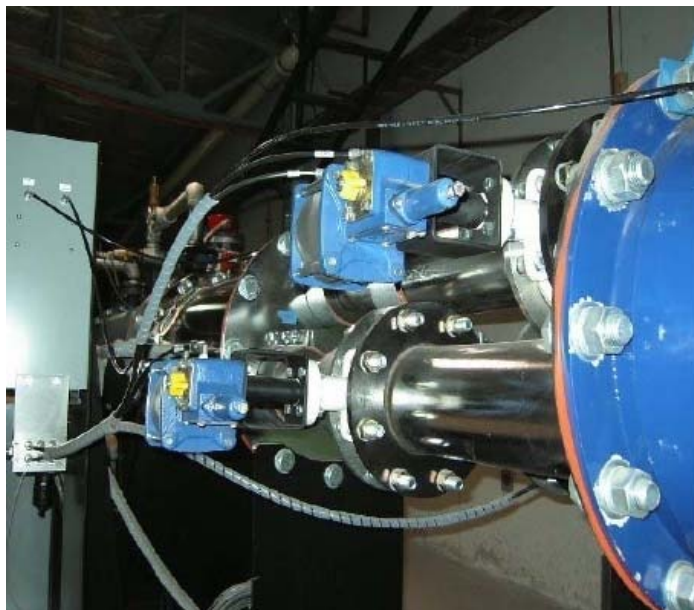
## CAPÍTULO 8 ANEXOS

Túnel de doble dilución marca AVL-Pierburg, de acero inoxidable, con sistema de muestreo gravimétrico para material particulado. Esta configuración cumple con la Directiva Europea 1999/96 EC.



### *CVS-CFV*

Sistema de muestreo de volumen constante, mediante control de flujo por venturis, con sistema de regulación de temperatura de los gases de escape diluidos mediante un intercambiador de calor. El equipo cuenta con dos pares de bolsas para la acumulación de muestra de gases de escape diluidos y de aire de dilución, separadamente en cada par .



***Banco de analizadores AMA 4000:***

Sistema analizador de gases AVL-Pierburg, con método FID para hidrocarburos totales (HCT) y metano (CH<sub>4</sub>). Método IRD para monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y método CLD para óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).



***Termodilutor-CPC.***

Sistema que comprende un termodilutor de la muestra, regulable en rangos de dilución entre 18 y 1800 veces y de temperaturas de entre 0 y 400 °C. El equipo CPC (Condensation Particle Counter), permite medir las concentraciones de número de partículas sólidas en la muestra termocondicionada, en rango de tamaños desde 10 nm.



***TEOM.***

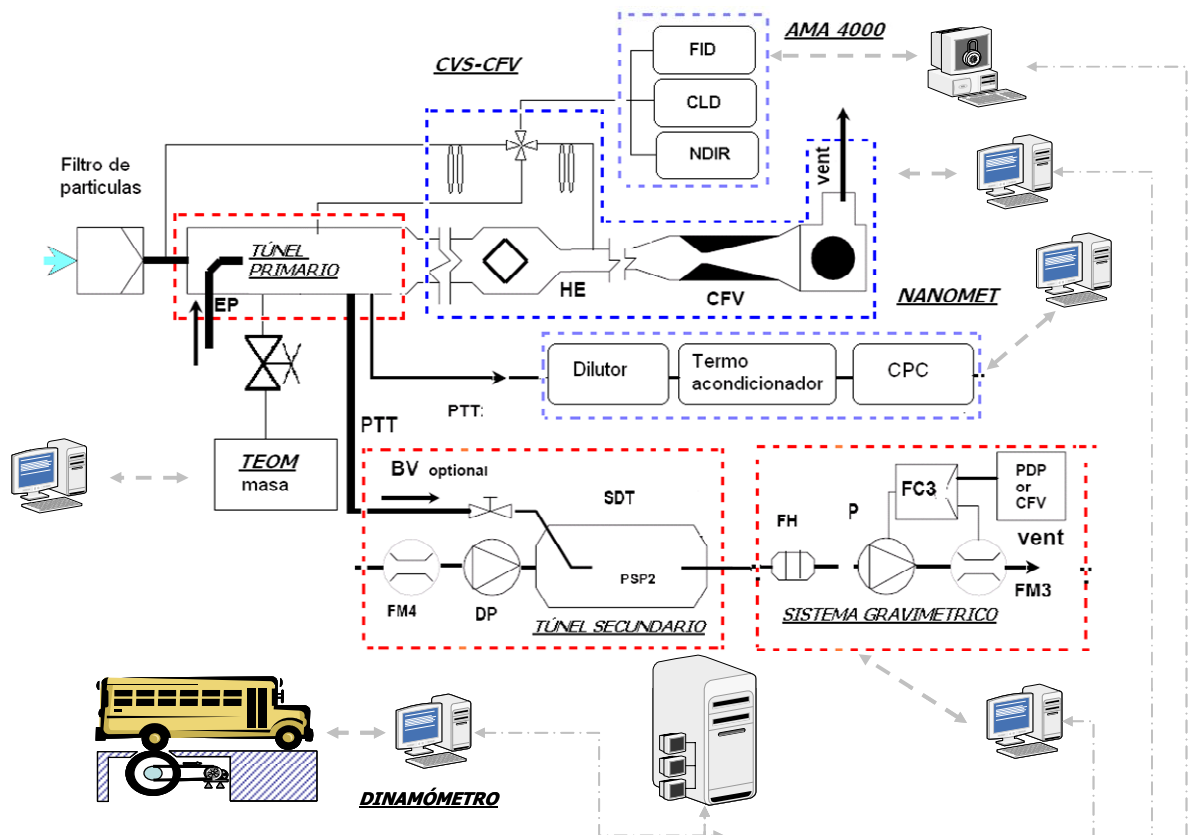
Equipo marca Rupprecht & Patashnick Co. Inc, modelo Teom Serie 1105, para medir la concentración instantánea de la masa de partículas totales, en microgramos por metro cúbico.



***Integración de los Equipos.***

Los equipos del laboratorio, a excepción del Termodilutor-CPC y Teom, están integrados a través de un Sistema de Automatización que controla y sincroniza la operación de los equipos, registra los valores medidos y calcula las emisiones de THC, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y Material Particulado durante la prueba en gramos por kilómetro.

Un esquema general del laboratorio se presenta en la Figura.



### 8.1.2 Método de Medición de Emisiones

Para la determinación de las sustancias contaminantes emitidas, los buses de la flota experimental fueron sometidos a ciclos de conducción simulados sobre el dinamómetro de chasis. Dichos ciclos son una representación de las condiciones de carga, velocidad y aceleración a las que es sometido el vehículo en la operación real en la vía pública.

Durante el desarrollo del ciclo, la totalidad de los gases de escape son recolectados a través de una sonda que los conduce al túnel de dilución, donde se mezclan con aire ambiente adecuadamente filtrado, para generar una muestra diluida. Las condiciones constructivas del túnel permiten una homogenización de la muestra, la que es posteriormente conducida a los distintos instrumentos de análisis, para la determinación de las concentraciones de cada sustancia en estudio. El flujo de los gases diluidos es conocido y prácticamente constante, debido al uso del equipo CVS-CFV, que cuenta con venturis cuyos

coeficientes de calibración conocidos permiten el cálculo de dicho flujo. Para mayor exactitud en la estimación del éste, el equipo CVS-CFV posee un intercambiador de calor, que regula la temperatura de la muestra diluida, en un rango de  $\pm 6$  [°K].

A continuación se presenta el método de medición para la concentración de cada sustancia en estudio:

### ***Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>):***

Para la determinación de estos contaminante, una muestra diluida es extraída desde el túnel de dilución y es conducida hasta el banco analizador de gases IRD. De esta forma la concentración es determinada con una frecuencia de 2 Htz y posteriormente integrada para todo el ciclo de conducción, calculándose la concentración media para ambos contaminantes. Simultáneamente, otra muestra es dirigida a la bolsa de muestreo del equipo CVS-CFV, para ser también acumulada durante todo el ciclo. En la bolsa es analizada al final de la prueba. Este segundo valor es contrastado con el resultado modal para efectos de validación.

### ***Hidrocarburos Totales (HCT):***

Para analizar este contaminante, se utiliza una sonda calefaccionada a 190 [°C], que conduce la muestra desde el túnel de dilución a un analizador FID. Para este caso, como para el anterior, los valores son muestreados por el analizador a una frecuencia de 2 Htz y posteriormente integrado para la determinación de la concentración media obtenida para el ciclo.

### ***Oxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>):***

Para la determinación de esta sustancia, una muestra es extraída desde el túnel y conducida a través de una sonda calefaccionada a 190 [°C], a un analizador CLD, donde es muestreada con una frecuencia de 2 Htz, durante todo el ciclo, y posteriormente integrada para calcular el valor medio.

### ***Material Particulado:***



La masa total de material particulado es determinado a través del método gravimétrico. Para ello una muestra de los gases diluidos es conducida a través de filtros que acumulan el material particulado. Dichos filtros son pesados en una cámara de pesaje acondicionada, previa estabilización de 3 o más horas, en condiciones de humedad y temperatura controladas. La masa de material particulado es determinado por diferencia del peso del filtro con material particulado, menos el peso del filtro medido antes del ensayo (método gravimétrico). Adicionalmente, otra muestra es conducida al equipo TEOM, que calcula instantáneamente la concentración de material particulado, mediante un elemento oscilante, por variación de la frecuencia de oscilación, asociada a la variación de la masa en un filtro dispuesto en dicho elemento.

***Número de Partículas:***

Para la determinación del número de partículas la muestra es conducida hasta un termodilutor donde es nuevamente diluida a razón de 16 a 1800 veces para posteriormente pasar a través de un tubo de evaporación donde se eliminan las sustancias líquidas presentes en la muestra. Debido a la dilución previa se evita la recondensación de las sustancias volátiles aguas abajo del tubo de evaporación. Dicha muestra, acondicionada, es analizada por el equipo CPC (Condensation Particle Counter), donde se determinan las partículas sólidas por centímetro cúbico.

***Cálculo de Emisiones Másicas:***

Una vez determinadas las concentraciones medias de cada contaminante durante el ciclo, se calcula, excepto para el método gravimétrico que entrega directamente valores en masa, la emisión en masa a través de la siguiente ecuación:

$$E_i = \frac{V_{mix} \times \rho_i \times \left[ E_{con\_i} - E_{fondo\_i} \times \left[ 1 - \frac{1}{FD} \right] \right]}{10^6}$$

Donde:

$E_i$  : Emisión másica total en gramos del contaminante  $i$  durante el ciclo de conducción.

$V_{mix}$  : Volumen total de gases de escape diluidos desplazados durante el ciclo.

$\rho_i$  : Densidad del contaminante  $i$

$E_{con_i}$  : Concentración en partes por millón [ppm] del contaminante  $i$  en los gases de escape diluidos.

$E_{fondo_I}$  : Concentración del contaminante  $i$  en el aire de dilución, en [ppm]

$FD$  : Factor de dilución.

Para el caso de los Óxidos de Nitrógeno, el resultado final se multiplica por el factor de corrección por humedad ( $Kh$ ).

## 8.2 ANEXO B

### 8.2.1 Ficha Técnica camión sin norma

FICHA TECNICA	DJ-4964	
Identificación	Patente	DJ-4964
	Código	PESSN1983
	Categoría Camión	Pesado Plataforma
	Año	1986
	Km Recorridos	435200
	Fecha Chequeo 3CV	30/01/2008
	Fecha Llegada 3CV	04/02/2008
	Fecha Retiro 3CV	12/02/2008
Chasis	VIN	701933
	Marca	Mercedes Benz
	Modelo	OM-1419
Proveedor	Representante Chile	Kauffmann
	Origen	Brasil
Dimensiones	PBV [Kg]	21845
	Peso en Vacío [kg]	14995
	Carga Máxima [kg]	12000
	Largo [m]	6,2
	Ancho [m]	2,5
Motor	Marca	MERCEDES BENZ
	Modelo	OM-401
	N° Motor	9030806
	Tipo de Inyección	BOMBA EN LINEA
	Pot. Máxima [CV]	190 CV
	Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]	7000
	N° Cilindros	6
	Posición Cilindros	V
	N° Valv. X Cilindro	3
	Turbo	NO
	Intercooler	NO
Norma Emisión	S/N	
Caja de cambios	Tipo	Mecánica
	N° Marchas	12
Sistema de frenos	Accionamiento	Neumatico de 2 circuitos
	Eje Delantero	Tambor
	Eje Trasero	Tambor
Sistema eléctrico	N° Baterías	2
	Tensión	24 V
	Alternad.	80 A
	Bater.(Ah)	135
Combustible	Tipo HC	Diesel
	Cap.est. [lts]	300

## 8.2.2 Ficha técnica camión con norma

FICHA TECNICA	NY-2308	
Identificación	Patente	NY-2308
	Código	PESEII1996
	Categoría Camión	Pesado Plataforma
	Año	1996
	Km Recorridos	207113
	Fecha Chequeo 3CV	14/02/2008
	Fecha Llegada 3CV	18/02/2008
	Fecha Retiro 3CV	27/02/2008
Chasis	VIN	ZCFA1LLHOT2161058
	Marca	Iveco
	Modelo	150 E 27 R
Proveedor	Representante Chile	Sigdotek
	Origen	Italia
Dimensiones	PBV [Kg]	17650
	Peso en Vacío [kg]	12650
	Carga Máxima [kg]	10000
	Largo [m]	6,15
	Ancho [m]	2,45
Motor	Marca	IVECO
	Modelo	8360.46
	N° Motor	223716
	Tipo de Inyección	BOMBA EN LINEA
	Pot. Máxima [CV]	196 KW
	Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]	9000
	Posición Cilindros	V
	N° Valv. X Cilindro	4
	Turbo	SI
	Intercooler	SI
	Norma Emisión	EURO II
Caja de cambios	Tipo	Mecánica
	N° Marchas	8
Neumáticos - llantas	Dimen. Eje Delantero	275/80 R22,5
	Dimen. Eje Trasero	275/80 R22,5
	Llantas Eje Delantero	8,25 x 22,5
	Llantas Eje Trasero	8,25 x 22,5
Sistema de frenos	Accionamiento	Neumatico de Circuitos Independientes
	Eje Delantero	Tambor
	Eje Trasero	Tambor
Sistema eléctrico	N° Baterías	2
	Tensión	24 V
	Alternad.	80 A
	Bater.(Ah)	135
Combustible	Tipo HC	Diesel
	Cap.est. [lts]	500

### 8.3 ANEXO C

#### 8.3.1 Mediciones en camión sin norma con biodiesel de aceite refrito

		Camión sin norma								
		Diesel Comercial			Biodiesel Refrito 5%			Biodiesel Refrito 10%		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,55	0,67	0,89	1,82	0,72	1,00	1,95	0,79	1,10
	Máx	1,64	0,72	0,93	1,97	0,72	1,03	2,09	0,85	1,17
	Min	1,47	0,63	0,85	1,68	0,71	0,98	1,82	0,72	1,02
	Desv. Est.	0,07	0,04	0,04	0,12	0,01	0,03	0,12	0,06	0,06
	Prom + D	1,62	0,71	0,93	1,95	0,72	1,03	2,07	0,86	1,16
	Prom - D	1,48	0,62	0,86	1,70	0,71	0,98	1,83	0,73	1,04
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	8,19	6,18	6,69	8,63	6,38	6,95	8,57	6,42	6,98
	Máx	8,29	6,27	6,75	9,07	6,44	7,09	8,84	6,45	7,07
	Min	8,09	6,07	6,64	8,39	6,31	6,86	8,08	6,40	6,84
	Desv. Est.	0,08	0,10	0,06	0,31	0,05	0,10	0,35	0,02	0,10
	Prom + D	8,28	6,28	6,75	8,94	6,43	7,05	8,91	6,44	7,07
CO [gr/km]	Prom Ciclo	5,08	4,04	4,31	5,75	4,06	4,49	5,57	4,25	4,59
	Máx	5,20	4,16	4,37	6,38	4,63	4,94	5,73	4,49	4,79
	Min	4,98	3,94	4,21	5,13	3,44	4,01	5,36	4,02	4,47
	Desv. Est.	0,11	0,10	0,07	0,52	0,49	0,40	0,15	0,19	0,14
	Prom + D	5,18	4,13	4,38	6,27	4,55	4,89	5,72	4,44	4,73
	Prom - D	4,97	3,94	4,23	5,23	3,57	4,09	5,41	4,05	4,46
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	786	576	630	841	577	645	848	588	656
	Máx	792	582	636	888	585	660	881	590	665
	Min	780	573	627	809	570	636	797	587	642
	Desv. Est.	5	4	4	34	6	11	37	1	10
	Prom + D	790	580	634	875	583	655	885	590	666
MP Grav. [gr/km]	Prom Ciclo	0,84	0,70	0,73	0,76	0,64	0,67	0,77	0,65	0,68
	Máx	0,90	0,72	0,76	0,86	0,69	0,71	0,84	0,69	0,69
	Min	0,78	0,66	0,69	0,66	0,60	0,64	0,69	0,59	0,66
	Desv. Est.	0,05	0,03	0,03	0,08	0,04	0,03	0,06	0,04	0,01
	Prom + D	0,88	0,73	0,77	0,84	0,68	0,70	0,83	0,68	0,69
	Prom - D	0,79	0,67	0,70	0,67	0,60	0,64	0,71	0,61	0,67

8.3.2 Mediciones en camión sin norma con biodiesel de raps

		Camión sin norma								
		Diesel Comercial			Biodiesel Raps 5%			Biodiesel Raps 10%		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,55	0,67	0,89	1,45	0,61	0,82	1,64	0,67	0,92
	Máx	1,64	0,72	0,93	1,50	0,63	0,85	1,75	0,68	0,95
	Min	1,47	0,63	0,85	1,37	0,60	0,79	1,47	0,67	0,87
	Desv. Est.	0,07	0,04	0,04	0,06	0,02	0,02	0,13	0,01	0,03
	Prom + D	1,62	0,71	0,93	1,51	0,63	0,85	1,77	0,68	0,96
	Prom - D	1,48	0,62	0,86	1,39	0,59	0,80	1,52	0,67	0,89
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	8,19	6,18	6,69	8,58	6,38	6,95	8,75	6,33	6,96
	Máx	8,29	6,27	6,75	8,93	6,47	7,00	8,86	6,46	7,08
	Min	8,09	6,07	6,64	8,32	6,34	6,85	8,62	6,24	6,85
	Desv. Est.	0,08	0,10	0,06	0,26	0,06	0,07	0,10	0,10	0,10
	Prom + D	8,28	6,28	6,75	8,84	6,44	7,02	8,85	6,43	7,05
CO [gr/km]	Prom Ciclo	5,08	4,04	4,31	5,05	3,78	4,10	5,08	3,65	4,02
	Máx	5,20	4,16	4,37	5,29	4,06	4,29	5,26	3,94	4,28
	Min	4,98	3,94	4,21	4,92	3,55	3,99	4,87	3,35	3,74
	Desv. Est.	0,11	0,10	0,07	0,17	0,21	0,13	0,16	0,26	0,23
	Prom + D	5,18	4,13	4,38	5,22	3,99	4,23	5,24	3,91	4,25
	Prom - D	4,97	3,94	4,23	4,89	3,57	3,97	4,91	3,39	3,79
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	786	576	630	824	565	631	831	563	632
	Máx	792	582	636	858	575	638	837	571	639
	Min	780	573	627	792	556	621	822	556	626
	Desv. Est.	5	4	4	31	8	7	7	6	6
	Prom + D	790	580	634	855	574	639	838	569	638
	Prom - D	781	572	626	793	557	624	824	557	625
MP Grav. [gr/km]	Prom Ciclo	0,84	0,70	0,73	0,69	0,59	0,62	0,70	0,53	0,57
	Máx	0,90	0,72	0,76	0,79	0,63	0,64	0,71	0,54	0,58
	Min	0,78	0,66	0,69	0,62	0,55	0,59	0,69	0,51	0,57
	Desv. Est.	0,05	0,03	0,03	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01
	Prom + D	0,88	0,73	0,77	0,77	0,63	0,64	0,71	0,54	0,58
	Prom - D	0,79	0,67	0,70	0,61	0,55	0,59	0,68	0,52	0,57

8.3.3 Mediciones en camión con norma con biodiesel de aceite refrito

		Camión con norma								
		Diesel Comercial			Biodiesel Refrito 5%			Biodiesel Refrito 10%		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,16	0,34	0,55	1,30	0,31	0,56	1,37	0,32	0,59
	Máx	1,23	0,39	0,60	1,33	0,33	0,59	1,40	0,34	0,61
	Min	1,05	0,29	0,49	1,27	0,28	0,54	1,33	0,31	0,57
	Desv. Est.	0,07	0,04	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01
	Prom + D	1,23	0,38	0,60	1,33	0,33	0,58	1,40	0,34	0,61
	Prom - D	1,08	0,30	0,51	1,28	0,29	0,54	1,34	0,31	0,58
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	6,58	3,95	4,63	6,78	4,21	4,86	6,77	4,25	4,89
	Máx	6,78	4,02	4,68	6,96	4,36	5,03	6,90	4,47	5,07
	Min	6,38	3,90	4,57	6,69	3,99	4,68	6,59	4,13	4,83
	Desv. Est.	0,16	0,05	0,04	0,12	0,17	0,15	0,13	0,16	0,12
	Prom + D	6,74	4,00	4,67	6,91	4,38	5,01	6,90	4,41	5,01
	Prom - D	6,42	3,90	4,59	6,66	4,04	4,72	6,64	4,09	4,78
CO [gr/km]	Prom Ciclo	14,49	17,31	16,58	13,29	11,57	12,01	11,43	10,35	10,63
	Máx	15,09	17,69	17,01	14,08	12,68	12,87	11,86	10,78	10,80
	Min	13,57	16,97	16,10	12,33	10,83	11,48	10,85	9,80	10,33
	Desv. Est.	0,66	0,29	0,37	0,73	0,80	0,62	0,42	0,41	0,21
	Prom + D	15,16	17,60	16,95	14,01	12,37	12,63	11,85	10,76	10,84
	Prom - D	13,83	17,01	16,21	12,56	10,77	11,39	11,01	9,94	10,41
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	672	489	536	708	496	550	728	495	555
	Máx	685	495	540	724	505	556	739	504	560
	Min	657	486	530	692	489	541	724	486	547
	Desv. Est.	13	5	5	13	8	7	7	9	7
	Prom + D	685	493	541	721	503	556	736	504	561
	Prom - D	660	484	531	694	488	543	721	486	548
MP Grav. [gr/km]	Prom Ciclo	1,57	1,83	1,76	1,15	0,94	1,00	1,08	0,83	0,90
	Máx	1,74	1,90	1,86	1,19	0,96	1,02	1,10	0,87	0,93
	Min	1,36	1,77	1,68	1,09	0,90	0,97	1,06	0,81	0,88
	Desv. Est.	0,20	0,06	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
	Prom + D	1,77	1,88	1,83	1,20	0,97	1,01	1,10	0,86	0,92
	Prom - D	1,37	1,77	1,69	1,11	0,92	0,98	1,07	0,81	0,88

8.3.4 Mediciones en camión con norma con biodiesel de raps

		Camión con norma								
		Diesel Comercial			Biodiesel Raps 5%			Biodiesel Raps 10%		
		Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo	Fase 1	Fase 2	Total Ciclo
HC [gr/km]	Prom Ciclo	1,16	0,34	0,55	1,29	0,32	0,56	1,24	0,33	0,56
	Máx	1,23	0,39	0,60	1,43	0,38	0,63	1,29	0,35	0,58
	Min	1,05	0,29	0,49	1,09	0,28	0,49	1,19	0,29	0,55
	Desv. Est.	0,07	0,04	0,05	0,15	0,05	0,06	0,04	0,03	0,01
	Prom + D	1,23	0,38	0,60	1,44	0,36	0,63	1,28	0,35	0,57
	Prom - D	1,08	0,30	0,51	1,14	0,27	0,50	1,20	0,30	0,55
NOx [gr/km]	Prom Ciclo	6,58	3,95	4,63	6,94	4,14	4,85	6,83	4,24	4,90
	Máx	6,78	4,02	4,68	7,03	4,46	5,11	6,96	4,40	5,05
	Min	6,38	3,90	4,57	6,82	3,90	4,65	6,60	4,07	4,80
	Desv. Est.	0,16	0,05	0,04	0,09	0,23	0,19	0,17	0,14	0,11
	Prom + D	6,74	4,00	4,67	7,03	4,37	5,04	7,00	4,38	5,01
	Prom - D	6,42	3,90	4,59	6,85	3,90	4,66	6,67	4,10	4,80
CO [gr/km]	Prom Ciclo	14,49	17,31	16,58	13,00	13,00	13,00	13,49	12,74	12,93
	Máx	15,09	17,69	17,01	14,88	14,11	13,68	13,70	12,78	12,95
	Min	13,57	16,97	16,10	12,27	11,83	12,39	13,29	12,70	12,91
	Desv. Est.	0,66	0,29	0,37	1,26	1,08	0,60	0,17	0,04	0,02
	Prom + D	15,16	17,60	16,95	14,26	14,08	13,60	13,66	12,77	12,95
	Prom - D	13,83	17,01	16,21	11,74	11,92	12,40	13,33	12,70	12,92
CO2 [gr/km]	Prom Ciclo	672	489	536	728	493	553	737	498	559
	Máx	685	495	540	741	500	562	751	509	572
	Min	657	486	530	708	486	543	719	482	547
	Desv. Est.	13	5	5	15	6	8	14	11	10
	Prom + D	685	493	541	743	498	561	751	509	570
	Prom - D	660	484	531	712	487	545	724	487	549
MP Grav. [gr/km]	Prom Ciclo	1,57	1,83	1,76	1,41	1,30	1,33	1,38	1,30	1,32
	Máx	1,74	1,90	1,86	1,72	1,37	1,35	1,45	1,39	1,40
	Min	1,36	1,77	1,68	1,23	1,16	1,30	1,34	1,23	1,26
	Desv. Est.	0,20	0,06	0,07	0,22	0,10	0,02	0,05	0,07	0,06
	Prom + D	1,77	1,88	1,83	1,63	1,40	1,35	1,43	1,36	1,38
	Prom - D	1,37	1,77	1,69	1,18	1,20	1,31	1,33	1,23	1,25