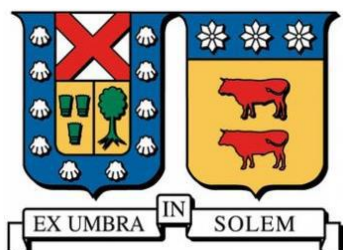


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAISO – CHILE



“EFECTO DE MEZCLAS DE BIODIESEL EN LA EMISIÓN DE
AEROSOL DE VEHÍCULO DIESEL MEDIANTE ENSAYOS
EXPERIMENTALES EN DINAMÓMETRO DE CHASIS”

LEANDRO ANDRES VELARD CÁCERES

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MAURICIO OSSES ALVARADO
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES

Enero - 2025

Agradecimientos

Este trabajo es el cierre de un ciclo que me acompañó y pesó por largos años, una carga que a veces se hacía demasiado pesada. Por mucho tiempo llegué a decir que no lo necesitaba, pero me di cuenta de que la espina incisiva siempre iba a estar ahí, recordándome que no completé una tarea importantísima que no solo le debía a mis padres, sino también a mí.

Por eso, la primera persona a quien quiero agradecerle, aunque suene ególatra, es a mí mismo, por no haber bajado los brazos por más oscuro que se viera el panorama. Como algún sabio mago dijo alguna vez: “No son nuestras habilidades las que muestran cómo somos, sino nuestras elecciones”. Se tomó la difícil decisión de darle una tercera oportunidad; sí, tercera, ya que la segunda fallé.

No obstante, este logro no habría sido posible sin el apoyo incondicional, que agradezco de todo corazón, de mis padres, Geanette y Rubén, quienes nunca perdieron la fe; de mi familia y amigos; de mi profesor guía, Mauricio, que no dudó en retomar el trabajo pese a mi deserción; de Diego, quien me insistió incansablemente para que lo terminara; de mi coach, Mariano, que me apoyó en los momentos de flaqueza; de Vicente, Eduardo y Andrea, por sus cartas de recomendación para poder reincorporarme a la universidad; y de Francisco, que me ayudó con sus consejos para la presentación final.

Quisiera finalizar diciendo que, si te encuentras en una situación emocional complicada, no escatimes en recursos para pedir ayuda, porque nunca se le negará a quien realmente la pida. Y a aquellas personas que tienen pendientes de cualquier tipo: no se rindan. La dicha de completar aquello que te pesó por tanto tiempo es impagable.

Agradecimientos al proyecto FONDECYT REGULAR Número 1241477 y a Fondef D90I-1070 por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de memoria.

Resumen

El presente estudio se enmarca en el proyecto Fondef D90I-1070 y en el proyecto FONDECYT REGULAR Número 1241477. En esta etapa, el enfoque se ha centrado en la evaluación y análisis de las emisiones de carbono negro y material particulado (MP10, MP2.5, MP1) en cuatro tipos de biocombustibles: aceites de fritura, grasa animal, palma y soya.

El objetivo del proyecto fue estudiar las emisiones gaseosas y de material particulado durante la combustión de biodiésel en mezclas para vehículos comerciales, utilizando un laboratorio "fuera de ruta" instalado en la Sede José Miguel Carrera de la UTFSM. Este laboratorio, equipado con un dinamómetro de rodillos, analizadores de gases y un túnel de dilución, permitió medir diferentes contaminantes como CO₂, CO, HC, NO_x, MP y BC.

En mi contribución al proyecto, se ha realizado un análisis detallado de las emisiones de BC y MP mediante métodos gravimétricos y de granulometría. A través de pruebas en un dinamómetro de chasis, se ha recopilado una base de datos exhaustiva sobre las emisiones de estos contaminantes.

Los resultados obtenidos indican que las emisiones de MP y BC tienden a disminuir con mayores proporciones de biocombustible en la mezcla. Específicamente, el biocombustible de aceite de fritura ha demostrado ser el más efectivo en reducir las emisiones en proporciones B5 y B20, seguido por el aceite de palma y la grasa animal. En contraste, la falta de datos completos sobre el biocombustible de soya limita un análisis exhaustivo de su efectividad.

Abstract

The present study is part of the Fondef D90I-1070 project and FONDECYT REGULAR Number 1241477 project . At this stage, the focus has been on the evaluation and analysis of black carbon (BC) and particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) emissions in four types of biofuels: frying oils, animal fat, palm, and soybean.

The project's objective was to study the gaseous and particulate matter emissions during the combustion of biodiesel blends for commercial vehicles, using an "off-road" laboratory installed at the José Miguel Carrera Campus of UTFSM. This laboratory, equipped with a roller dynamometer, gas analyzers, and a dilution tunnel, enabled the measurement of various pollutants such as CO₂, CO, HC, NO_x, PM, and BC.

In my contribution to the project, a detailed analysis of BC and PM emissions was performed using gravimetric and granulometric methods. Through tests conducted on a chassis dynamometer, an extensive database on the emissions of these pollutants was compiled.

The results obtained indicate that PM and BC emissions tend to decrease with higher proportions of biofuel in the blend. Specifically, frying oil biofuel has proven to be the most effective in reducing emissions in B5 and B20 proportions, followed by palm oil and animal fat. In contrast, the lack of complete data on soybean biofuel limits a thorough analysis of its effectiveness.

Glosario

BC	black carbon, carbono negro u hollín
FIE	fuel injection equipment
MP	material particulado
NPAH	nitro-PAH
PAH	polycyclic aromatic hydrocarbon(s)
HACA	hydrocarbon abstraction and carbon addition
BHN	binary homogeneous nucleation
IMN	ion- mediated nucleation
DPF	diesel particulate filter
FID	flame ionization detector
NO _x	oxides of nitrogen
CA	crank angle
NEDC	nuevo ciclo de conducción europeo
EUDC	ciclo de conducción extraurbano
UDC	ciclo de conducción urbano
HC	hidrocarburos sin quemar
CO	monóxido de carbono
µm	micrómetro
CVS	compensador variado de sensibilidad
PTS	partículas totales en suspensión

Índice

1	Marco teórico	17
1.1	MP y BC en motores de combustión interna encendido por compresión ...	17
1.1.1	Propiedades de las partículas de aerosol	26
1.1.2	Composición del MP en motores diésel.....	28
1.1.3	Formación del MP (localización).....	46
1.1.4	Caracterización.....	53
1.1.5	MP y BC con mezclas de biodiesel.....	60
2	Metodología	63
2.1	Combustibles.....	63
2.1.1	Aceite de fritura.....	66
2.1.2	Grasa animal.....	68
2.1.3	Aceite palma.....	69
2.1.4	Aceite de soya	70
2.2	Equipamiento	71
2.2.1	Banco dinamométrico	71
2.2.2	Túnel de dilución.....	74
2.2.3	Vehículo	75
2.3	Instrumentos de medición de MP y BC	76
2.3.1	Método gravimétrico	77
2.3.2	Espectrómetro laser de aerosol.....	80
2.3.3	Aetalometro.....	81
2.4	Procedimiento experimental y protocolos.....	82
2.4.1	Metodología de análisis para emisión de MP	82
2.4.2	Metodología de análisis para emisión de BC	85
3	Resultados	88
3.1	Material Particulado	88
3.1.1	Análisis transiente	88
3.1.2	Gravimetría	109
3.2	Black Carbon.....	116
4	Conclusiones y recomendaciones	129

4.1	Conclusiones generales	129
4.2	Conclusiones específicas.....	131
4.3	Recomendaciones.....	138
5	Bibliografía	140
6	Anexo	141
6.1	Anexo A – Especificaciones técnicas.	141
6.2	Anexo B – Resultados transiente MP para distintas granulometrías.	142
6.2.1	Aceite de fritura, granulometría de 10 μm para distintas mezclas.	142
6.2.2	Aceite de fritura, granulometría de 2.5 μm para distintas mezclas.	149
6.2.3	Aceite de fritura, granulometría de 1 μm para distintas mezclas.	155
6.2.4	Grasa animal, granulometría de 10 μm para distintas mezclas.	161
6.2.5	Grasa animal, granulometría de 2.5 μm para distintas mezclas.	169
6.2.6	Grasa animal, granulometría de 1 μm para distintas mezclas.	177
6.2.7	Aceite de palma, granulometría de 10 μm para distintas mezclas.	185
6.2.8	Aceite de palma, granulometría de 2.5 μm para distintas mezclas.	193
6.2.9	Aceite de palma, granulometría de 1 μm para distintas mezclas.	201
6.2.10	Aceite de soya, granulometría de 10 μm para distintas mezclas.....	209
6.2.11	Aceite de soya, granulometría de 2.5 μm para distintas mezclas.....	213
6.2.12	Aceite de soya, granulometría de 1 μm para distintas mezclas.....	217
6.3	Anexo C – Comparación granulométrica partida en frio vs. promedio emisiones MP en transiente.....	221
6.3.1	Aceite de fritura vs. partida en frio.	221
6.3.2	Aceite de palma vs. partida en frio.....	223
6.3.3	Aceite de soya vs. partida en frio.	225
6.3.4	Grasa animal vs. partida en frio.	226
6.4	Anexo D – Resultados granulométricos BC en transiente.	228
6.4.1	Aceite de fritura, granulometría para distintas mezclas.	228
6.4.2	Grasa animal, granulometría para distintas mezclas.	235
6.4.3	Aceite de palma, granulometría para distintas mezclas.	243
6.4.4	Aceite de soya, granulometría para distintas mezclas.....	251
6.5	Anexo E – Comparación granulométrica partida en frio vs. promedio emisiones BC.	255
6.5.1	Aceite de fritura: partida en frio vs. promedio emisiones BC por mezcla.	255
6.5.2	Grasa animal: partida en frio vs. promedio emisiones BC por mezcla.	257

6.5.3	Aceite de palma: partida en frio vs. promedio emisiones BC por mezcla.	259
6.5.4	Aceite de soya: partida en frio vs. promedio emisiones BC por mezcla.	261
6.6	Anexo F – Resultados gravimétricos MP.....	262
6.6.1	Biocombustible Fritura.	262
6.6.2	Biocombustible Grasa Animal.	267
6.6.3	Biocombustible Aceite de Palma.	274
6.6.4	Biocombustible Soya.	280

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1 Inventario global de las emisiones de particulado. [3].....	20
Ilustración 1.2 Esquema de partículas seccionado. [12]	21
Ilustración 1.3 Composición del MP. [12].....	22
Ilustración 1.4 Fuentes o materia prima de las fracciones. [12].....	24
Ilustración 1.5 Esquema conceptual de la formación del BC.[12].....	29
Ilustración 1.6 Modelo conceptual del desarrollo del penacho. [12]	36
Ilustración 1.7 Llama mezcla controlada.	37
Ilustración 1.8 Pliegue y colapso de la pluma de combustión. [11].....	38
Ilustración 1.9 Distribución de tamaño de partículas emitidas por un motor de combustión interna: en función de su número, superficie y masa.	46
Ilustración 1.10 Microestructura de la esférula.	55
Ilustración 2.1 Tambor de biodiésel de la empresa FAME.....	67
Ilustración 2.2 Contenedor biodiesel grasa animal (Fuente propia).	68
Ilustración 2.3 Banco de ensayo de potencia MAHA FPS 2700. [4].....	72
Ilustración 2.4 Rack que contiene computador de control del dinamómetro. (Fuente propia)	73
Ilustración 2.5 Dimensiones generales del túnel de dilución Pierburg. [17]	74
Ilustración 2.6 Filtros de MP10.....	78
Ilustración 2.7 Los porta-filtros en la figura izquierda y el porta-filtro abierto junto con la manipulación de este en la foto derecha.....	79
Ilustración 2.8 Principio de funcionamiento del espectrómetro laser de aerosol. [14]	81
Ilustración 2.9 MicroAeth.	82
Ilustración 2.10 Grafico en transiente para MP. Fuente propia.	84
Ilustración 2.11 Grafico acumulado o integrado para MP. (Fuente propia)	84
Ilustración 2.12 Grafico en transiente para BC. (Fuente propia).	87

Ilustración 2.13 Grafico acumulado o integrado para BC. (Fuente propia).....	87
Ilustración 3.1 Grafico MP10 – B0 – Aceite de palma, repetitividad ensayos. (Fuente propia)	89
Ilustración 3.2 Grafico promedio MP10 – B0 – Aceite de palma. (Fuente propia)....	90
Ilustración 3.3 Grafico emisión acumulada MP10 – B0 – Aceite de palma, repetitividad ensayos. (Fuente propia)	91
Ilustración 3.4 Gráfico promedio acumulado MP10 – B0 – Aceite de palma. (Fuente propia)	91
Ilustración 3.5 Gráfico por granulometría de promedio vs frio. (Fuente propia)	93
Ilustración 3.6 Comparación entre mezclas, aceite de fritura. (Fuente propia)	94
Ilustración 3.7 Comparación entre mezclas, grasa animal. (Fuente propia)	94
Ilustración 3.8 Comparación entre mezclas, aceite de palma. (Fuente propia).....	95
Ilustración 3.9 Comparación entre mezclas, aceite de soya. (Fuente propia)	95
Ilustración 3.10. Tendencias de mezclas MP.	99
Ilustración 3.11 Gravimetría PTS partida en frio Aceite de Palma B5. (Fuente propia)	110
Ilustración 3.12 Gravimetría PM2.5 partida en caliente Aceite de Palma B5. (Fuente propia)	111
Ilustración 3.13 Gravimetría promedio PM2.5 partida en caliente Palma. (Fuente propia)	112
Ilustración 3.14 Emisión por ensayos PM2.5 aceite de Palma. (Fuente propia).....	113
Ilustración 3.15 Emisión promedio PM2.5 Aceite de Palma. (Fuente propia)	113
Ilustración 3.16. Comparación factores de emisión promedio para distintos biocombustibles. (Fuente propia).....	114
Ilustración 3.17 Grafico BC – B5 – Aceite de palma, repetitividad ensayos. (Fuente propia)	116
Ilustración 3.18 Grafico promedio BC – B5 – Aceite de palma. (Fuente propia)	117
Ilustración 3.19 Grafico emisión acumulada BC – B5 – Aceite de palma, repetitividad ensayos. (Fuente propia)	118

Ilustración 3.20 Grafico promedio acumulado BC – B5 – Aceite de palma. (Fuente propia)	118
Ilustración 3.21 Grafico por granulometría de promedio vs frio. (Fuente propia) ...	119
Ilustración 3.22 Comparación entre mezclas BC, aceite de fritura. (Fuente propia)	120
Ilustración 3.23 Comparación entre mezclas BC, grasa animal. (Fuente propia).....	120
Ilustración 3.24 Comparación entre mezclas BC, aceite de palma. (Fuente propia)	121
Ilustración 3.25 Comparación entre mezclas BC, aceite de soya. (Fuente propia)...	121
Ilustración 3.26. Tendencias de mezclas en BC. (Fuente propia)	124

Índice de tablas

Tabla 1. Requisitos combustible A1.	64
Tabla 2: Perfil de esteres. (valores otorgados por el fabricante).....	65
Tabla 3: Propiedades medidas. (valores otorgados por fabricante)	65
Tabla 4. Propiedades termo físicas del combustible. [4]	67
Tabla 5: Propiedades fisicoquímicas de biodiesel grasa animal.	68
Tabla 6. Características banco de ensayo de potencia MAHA FPS 2700. [4].....	73
Tabla 7. Sistema de control emisiones de camioneta Katana L-200. Fuente [20]....	75
Tabla 8. Resumen emisiones MP Fritura.	97
Tabla 9. Resumen emisiones MP Grasa animal.....	97
Tabla 10. Resumen emisiones MP Palma.	98
Tabla 11. Resumen emisiones MP Soya.	98
Tabla 12. Consumo combustible Fritura.	101
Tabla 13. Poder calorífico aceite de Fritura.	101
Tabla 14. Energía masa combustible Fritura.	102
Tabla 15. Factor de emisión por unidad de masa MP Fritura.	102
Tabla 16. Factor de emisión por unidad de energía MP Fritura.....	102
Tabla 17. Consumo combustible Grasa animal.....	103
Tabla 18. Poder calorífico aceite de Grasa animal.....	103
Tabla 19. Energía masa combustible Grasa animal.	103
Tabla 20. Factor de emisión por unidad de masa MP Grasa animal.	104
Tabla 21. Factor de emisión por unidad de energía MP Grasa animal.	104
Tabla 22. Consumo combustible Palma.....	105
Tabla 23. Poder calorífico aceite de Palma.	105
Tabla 24. Energía masa combustible Palma.	105
Tabla 25. Factor de emisión por unidad de masa MP Palma.	106
Tabla 26. Factor de emisión por unidad de energía MP Palma.	106

Tabla 27. Consumo combustible Soya.....	107
Tabla 28. Poder calorífico aceite de Soya.....	107
Tabla 29. Energía masa combustible Soya.	107
Tabla 30. Factor de emisión por unidad de masa MP Soya.	108
Tabla 31. Factor de emisión por unidad de energía MP Soya.	108
Tabla 32 Resumen emisiones BC.	123
Tabla 33. Factor de emisión por unidad de masa BC Fritura.	126
Tabla 34. Factor de emisión por unidad de energía BC Fritura.	126
Tabla 35. Factor de emisión por unidad de masa BC Grasa animal.	127
Tabla 36. Factor de emisión por unidad de energía BC Grasa animal.....	127
Tabla 37. Factor de emisión por unidad de masa BC Palma.	127
Tabla 38. Factor de emisión por unidad de energía BC Palma.....	128
Tabla 39. Factor de emisión por unidad de masa BC Soya.....	128
Tabla 40. Factor de emisión por unidad de energía BC Soya.	128

Introducción

La necesidad de producir y de moverse del ser humano ha influenciado en requerir más y más recursos para cumplir con los objetivos particulares de cada uno. Esto junto a un aumento de la población, ha hecho que se requiera de una matriz energética mayor, tanto para producir energía como para moverse o poder desempeñarse en el mundo actual. Como consecuencia de lo anterior la formación de contaminantes propios de la generación de energía y todo lo que engloba esta acción, está en auge provocando una serie de efectos negativos a nivel climático, social, ambiental y de salud.

El cambio climático es un problema vigente que urge solucionar hoy en día, no solo por nosotros y nuestras futuras generaciones, sino por la flora y fauna que se ve afectada por estos cambios climáticos que se pueden manifestar de distintas formas. Resulta crítico reducir las emisiones contaminantes antes que lleguen a niveles en que no haya vuelta atrás, y donde lleguemos al punto donde los daños climáticos sean inexpugnables, además de irreversibles. Ante esto Chile se ve en la disyuntiva de ampliar su matriz energética a opciones más amigables con el medio ambiente y que ayuden a satisfacer las demandas requeridas por el país, esto lo lleva a estudiar una serie de alternativas que existen actualmente, encontrándose dentro de estas los biocombustibles, surgiendo nuevas incertidumbres, como cual biocombustible importar y/o producir localmente, cuáles serían los impactos de su uso, su impacto sobre la calidad del aire, la importancia del origen del biocombustible, la proporción de mezcla a usar, en conjunto una serie de dudas que surgen y deben regirse por la norma DS N°11/2008, pero la escasa y contradictoria información hasta ahora, hace que la toma de decisiones se vea obstaculizada.

Para esto se realiza esta investigación enmarcada dentro del proyector FONDEF D90I-1070 [8] realiza una investigación donde realiza una misma metodología de análisis que permite relacionar este tipo de información.

El presente trabajo de título tiene por **objetivo principal** determinar experimentalmente las emisiones de material particulado y de carbono negro (también llamado “Black Carbon” u hollín), desde ahora MP y BC respectivamente, en un motor de combustión interna diésel con mezclas de biodiesel. Se realiza un estudio comparativo para biocombustibles de diversos orígenes con mayor factibilidad de ser usados en mezclas con diésel comercial. Las pruebas serán realizadas en un dinamómetro de chasis de manera de poder generar una base de datos de la emisión de estos contaminantes en específico. Esta base de datos podrá ser utilizada como herramienta informativa para saber cuánta contaminación se está generando realmente, y ser de utilidad para la toma de decisiones relativas a la implementación de políticas públicas respecto al uso de los biocombustibles. Los **objetivos específicos** son:

- Revisión internacional de antecedentes sobre aerosoles y BC en motores de combustión interna encendidos por compresión.
- Desarrollar protocolos de medición para determinación de MP y BC emitido por vehículos diésel.
- Realizar mediciones en dinamómetro de chasis en un vehículo comercial utilizando 4 tipos de biodiesel.
- Realizar un análisis comparativo de resultados a partir de las experiencias anteriores.

Este trabajo de título se estructura en cuatro capítulos principales, en el primer capítulo se describen diferentes tipos de antecedentes tanto internacionales como nacionales, los cuales tratan sobre estudios de las propiedades, su composición, formación y caracterización de emisiones de MP y de BC. Luego en el segundo capítulo se tiene la metodología que se utiliza en el trabajo, especificando los equipos e instalaciones que permiten realizar las mediciones de las emisiones, además de los protocolos correspondientes para el análisis de los datos generados. En el tercer capítulo se habla sobre los resultados y esto comprende un análisis en profundidad de las emisiones totales de MP y BC obtenidos por los equipos de medición, mediante tablas, gráficos lineales y en barras. Junto con esto se realiza una comparación entre los distintos métodos experimentales que se utilizaron. Finalmente se tiene el cuarto capítulo correspondiente a las conclusiones, donde se exhibe una conclusión general del trabajo de título y además de la recopilación de las conclusiones realizadas por cada uno de los capítulos, también se indican una serie de puntos correspondientes a recomendaciones para posibles futuros trabajos del proyecto que estén vinculados con este tema.

1 Marco teórico

En este capítulo se expone información que ayudará a comprender de mejor manera la composición, formación y caracterización del MP y BC en un motor de combustión interna diésel. Además, se muestra información del comportamiento de estos elementos al usar biocombustible.

1.1 MP y BC en motores de combustión interna encendido por compresión

Las partículas en suspensión o MP consisten en acumulación de diminutas piezas de sólidos o de gotitas de líquidos en la atmósfera ambiental, generada a partir de alguna actividad antropogénica o natural.

Los contaminantes en partículas no son idénticos física y químicamente, sino más bien están constituidos por una amplia variedad de tamaños, formas y composiciones químicas. Algunas de sus propiedades son mucho más nocivas para la salud. [9]

El interés por las partículas atmosféricas se debe a dos causas importantes:

- Afectación del balance de la radiación terrestre.
- Efectos nocivos sobre la salud. Las partículas penetran en los pulmones, los bloquean y evitan el paso del aire, lo cual provoca efectos dañinos.

Los efectos nocivos para la salud conllevan a:

- Deterioro de los sistemas respiratorio y cardiovascular.
- Alteración de los sistemas de defensa del organismo contra materiales extraños.
- Daños al tejido pulmonar.
- Carcinogénesis.
- Mortalidad prematura.

Las personas más sensibles son quienes padecen afecciones pulmonares o cardiovasculares crónicas obstructivas, influenza o asma, así como los ancianos y los niños.

Además, las partículas constituyen un problema ambiental. Por ejemplo, el BC puede absorber sobre su superficie irregular cantidades significativas de sustancias tóxicas. Las partículas de este contaminante son abundantes en los gases de escape y en los incendios. La quema de carbón origina BC, además de SO₂, cuyo aerosol del sulfato resultante, cuando hay niebla, se combina con el BC y origina un «neblumo» (smog) de consecuencias nocivas para la salud, especialmente en individuos con problemas respiratorios.

Hay diferentes razones generales por las cuales se comprende por qué las partículas grandes son menos preocupantes –que las pequeñas– para la salud humana. Se debe a que:

Las partículas gruesas se sedimentan rápidamente y se reduce la exposición a ellas por vía de inhalación.

Cuando se inhalan, las partículas gruesas se filtran de manera efectiva en la nariz (gracias a los vellos nasales) y por la garganta. Generalmente no llegan a los pulmones. En cambio, las partículas finas, al ser inhaladas, vía los pulmones (debido a lo cual se les denomina «respirables»), pueden adsorberse sobre las superficies de las células y, en consecuencia, afectar la salud.

El área superficial por unidad de masa de las partículas grandes es menor que las correspondientes a las pequeñas. Por ello, gramo a gramo su capacidad de transportar gases adsorbidos a cualquier parte del sistema respiratorio, y allí catalizar reacciones químicas y bioquímicas es, por lo tanto, menor.

Dispositivos como los precipitadores electrostáticos y los filtros precipitadores de polvo (saco de tela fina a cuyo través se fuerza a pasar el aire), utilizados para eliminar las partículas del aire, solo son eficientes para partículas gruesas. [2]

Fuentes emisoras: La atmosfera contiene partículas suspendidas de una diversidad enorme, sin embargo, hay algunas que se suelen repetir o ser las principales fuentes emisoras. A su vez las podemos separar en dos grupos de fuentes emisoras siendo estas los aerosoles en la naturaleza y los aerosoles antropogénica, siendo los océanos los contribuidores prolíficos para el primero, en cambio los segundos son emisiones generados por la huella que deja el hombre. En la Ilustración 1.1 podemos ver aproximaciones de las emisiones generadas por ambas fuentes durante el año.

Source	Amount (10 ⁹ kg/year)	
	Range	Best estimate
Natural		
Soil dust	1000–3000	1500
Sea salt	1000–10000	1300
Botanical debris	26–80	50
Volcanic dust	4–10 000	30
Forest fires	3–150	20
Gas-to-particle conversion ^b	100–260	180
Photochemical ^c	40–200	60
TOTAL	2200–24 000	3100
Anthropogenic		
Direct emissions	50–160	120
Gas-to-particle conversion ^d	260–460	330
Photochemical ^e	5–25	10
TOTAL	320–640	460

Ilustración 1.1 Inventario global de las emisiones de particulado. [3]

El particulado en motores de combustión interna puede ser generado tanto al interior de la cámara de combustión como en el sistema de escape. Las partículas emitidas por los motores de los vehículos, en cuanto a tamaño, se encuentran en los siguientes rangos de porte: modo de nucleación, modo de acumulación y el modo grueso. El modo de acumulación está construido de un núcleo solido hecho de bloques de carbono llamados esférulas¹, que al juntarse forman el aglomerado. Las esférulas son bastante parecidas en tamaño, estas van de 20-50 nm comúnmente, y los aglomerados que forman no poseen un numero definido, van desde un simple puñado hasta varios miles. En geometría podemos apreciar agrupaciones y cadenas. Una capa externa de componentes volátiles está unida a los aglomerados. Las partículas del modo de nucleación son más arcanas: muchos están formados por volátiles nucleados

¹ La esferula que no debe confundirse con las partículas “coke”: que son carcasas porosas de carbón de mucho mayor tamaño (1-50µm) [13]. Las esférulas son formadas en la pirolisis de combustibles gaseosos, o de componentes volatilizados de combustibles líquidos o sólidos, mientras que las partículas de “coke” son formadas en una pirolisis de fase líquida de gotitas de gasolina pesada. Las partículas de “coke” no nos importan en los motores de combustión interna, ya que el combustible es vaporizado al momento de ser pirolizado.

probablemente, pero algunos investigadores sugieren que algunos de ellos son sólidos, o que contienen diminutos núcleos sólidos. Las partículas del modo grueso están formadas de otros de los otros dos modos, mediante el proceso de almacenamiento y liberación del sistema de escape, o mediante la desintegración del material [12]. En la Ilustración 1.2 algunas partículas típicas que pueden ser emitidas por un motor de combustión interna, representado esquemáticamente: modalidad gruesa (los más grandes, se muestra en parte), modo de nucleación (las pequeñas), modalidad de acumulación (tamaño medio).

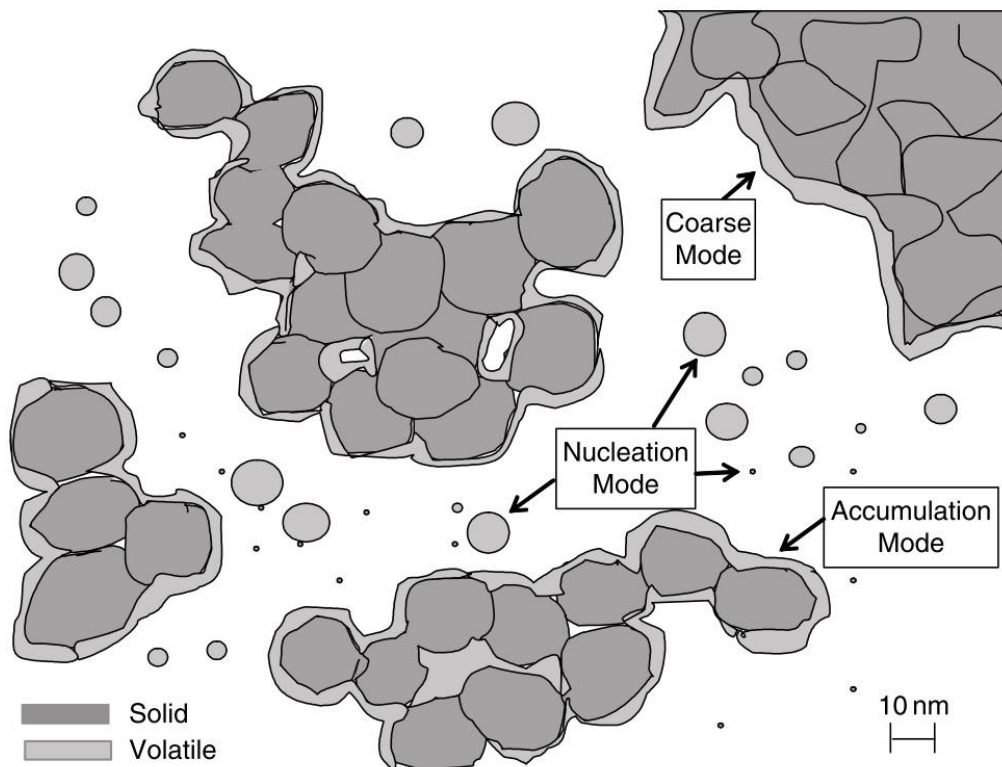


Ilustración 1.2 Esquema de partículas seccionado. [12]

Compositivamente, es posible identificar 5 distintivas fracciones: ceniza, carbonosa, orgánica, sulfúrica y nitratos. En la Ilustración 1.3 se presenta esquemáticamente la composición del particulado. Las primeras dos no son volátiles y las otras son volátiles. Este esquema de clasificación no es perfecto, las líneas que dividen las fracciones a menudo son difíciles de rastrear. La fracción orgánica posee de cientos a miles de componentes, que es discutiblemente la más compleja. La mayoría de las familias químicas están presentes, pero en distintas proporciones: ésteres, aromáticos, alcoholes, etc. La fracción de sulfato es predominantemente ácido sulfúrico y está asociado con el agua, pero también pueden ser sulfatos de metal. La fracción carbonosa es principalmente carbono. La fracción de nitrato indica ácidos nítricos. La fracción de cenizas consisten en lo que no se puede combustionar, y contiene principalmente metales, pero también algunos no-metales.

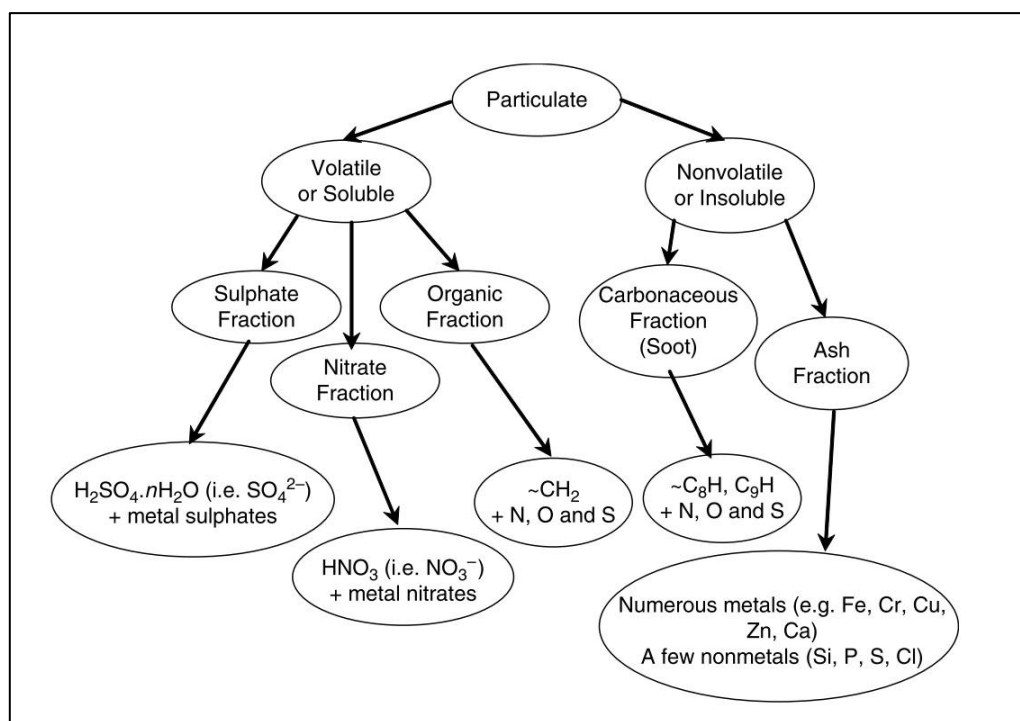


Ilustración 1.3 Composición del MP. [12]

¿Qué pasa en el motor?

De las 5 fracciones mencionadas anteriormente, dos de ellas se forman en la cámara de combustión, la fracción de carbono y las cenizas, o más probablemente, cuando la pluma de gases de escape entra en contacto con el aire ambiente. La fracción de carbón se forma en el motor por medio de la pirolisis de las moléculas de combustible, eso es cuando no hay suficiente oxígeno para completar la oxidación. La fracción orgánica surge también de las moléculas de combustible que escapan completamente de la combustión, o de las moléculas de combustible que están parcialmente modificadas. Esto sucede porque las reacciones que forman la fracción carbonosa son interrumpidas por alguna razón. Cada una de las 4 fracciones pueden surgir del lubricante, y por razones similares; pero la fracción orgánica es la más significativa en términos de masa. Otros contribuyentes de la fracción de cenizas puede ser el aire introducido del medio y la desintegración del material, pero son pequeñas en circunstancias normales. La Ilustración 1.4 intenta representar de una forma subjetiva, la importancia relativa de cada fuente, describiendo lo sucede en la cámara de combustión: el combustible, el lubricante, aire y materiales se convierten en fracciones carbonosas, orgánicas, cenizas y sulfatos. Subjetivamente la línea continua sugiere una importancia mayor; las líneas segmentadas sugieren una posibilidad poco estudiada. Un escenario menos obvio es la entrada de materiales externos (para la formación de ceniza) dentro del tanque de combustible durante el llenado.

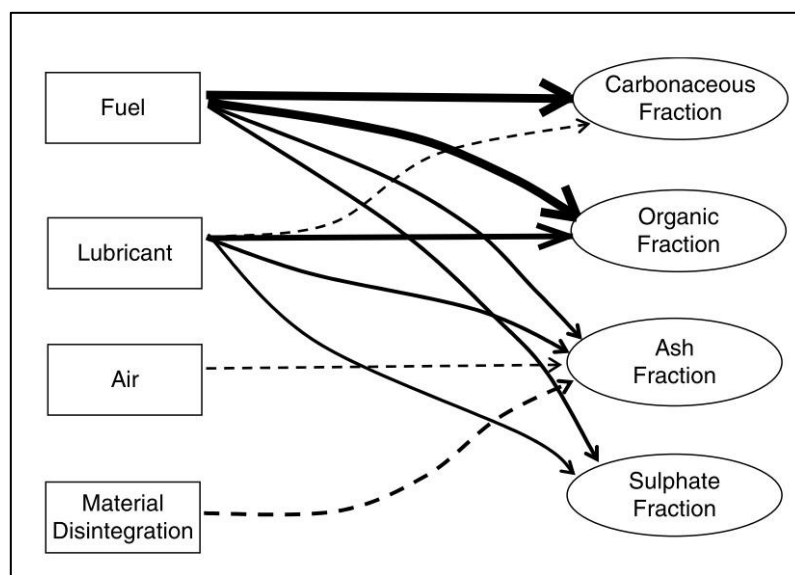


Ilustración 1.4 Fuentes o materia prima de las fracciones. [12]

Esto es lo que sucede en la cámara de combustión: el combustible, el lubricante, aire y materiales se convierten en fracciones carbonosas, orgánicas, cenizas y sulfatos. Subjetivamente la línea continua sugiere una importancia mayor; las líneas segmentadas sugieren una posibilidad poco estudiada. Un escenario menos obvio es la entrada de materiales externos (para la formación de ceniza) dentro del tanque de combustible durante el llenado.

¿Qué pasa en el escape?

La conversión de gas a partícula, eso es para los sulfatos y orgánicos, suceden tarde en el proceso de emisión de gases, y actúan de acuerdo con las leyes de saturación. En la pluma de escape, luego de salir del tubo de escape, depende mucho del proceso de dilución, y los efectos combinados de mezclado y enfriado, con el aire ambiental. El parámetro esencial aquí es el factor de dilución. El proceso de dilución en el laboratorio inevitablemente será distinto que el visto en el mundo real; el primero tenderá a un número finito, mientras que el segundo a infinito, hablando del factor de dilución. El

ácido sulfúrico, ya que desplaza el punto de rocío, permite que la conversión de gas a partícula ocurra a temperaturas más altas, esto es lejos del sistema de escape. Cambiando el equilibrio, a medida que se enfría el gas de escape, sería posible cambiar la composición del componente de la ceniza. Corrosión y sarro de los componentes del sistema de escape son otras fuentes de la ceniza.

En la siguiente subsección se explica de que se compone, como se forma y la caracterización del MP en motores diésel.

1.1.1 Propiedades de las partículas de aerosol

1.1.1.1 Diámetro y forma

La partícula de aerosol tiene un vasto rango de tamaños, desde racimos de moléculas de unos pocos nanómetros, hasta polvo visible en el viento de varias décimas de micrómetro. Como las partículas son irregulares se expresan en términos de diámetro, diámetro aerodinámico².

1.1.1.2 Distribución de tamaño

La distribución de tamaño se ve expresada en distintas formas: por su número, masa, volumen o su área de superficie. Estas distribuciones están estudiadas e interrelacionadas por una bien establecida relación matemática, generalmente logarítmicas.

1.1.1.3 Transporte y deposición

Las partículas no siempre siguen líneas de corriente establecidas, los mecanismos que influyen en el transporte son la termofóresis, difusión, inercia, sedimentación y atracción estática.

² El diámetro aerodinámico equivalente es el diámetro de una esfera de unidad de densidad (1 g por cm³) que tiene la misma velocidad de sedimentación en el mismo gas. Las partículas con el mismo DAE se comportan dinámicamente igual.

1.1.1.4 Transformación y mutación

Se refiere a la naturaleza proteica de los aerosoles, es decir que hay continuas modificaciones al tamaño de partícula, su perfil, forma y composición, dependiendo de las condiciones. La parte volátil o semi volátil está asociada a esta mutabilidad. Debido a su volatilidad, estas especies van desde gas a partícula y de partícula a gas, y algunas veces en un híbrido de estas dos.

1.1.2 Composición del MP en motores diésel

El MP es una compleja mezcla de partículas suspendidas en el aire las que varían en tamaño y composición dependiendo de sus fuentes de emisiones. Las partículas de fuentes móviles tienden a caer en una distribución bimodal referidas como “modo de núcleos” y “modo de acumulación”. [12]

En esta subsección seguirán la formación del MP de acuerdo con las cuatro principales fracciones, comenzando con los momentos iniciales en la cámara de combustión y terminando con los momentos finales cuando los gases de escape entran en contacto con el aire o el ambiente atmosférico. La fracción carbonosa o BC, formadas dentro del motor, se completa esencialmente en el instante que se abre la válvula de escape de los gases; la fracción de cenizas por su parte, dependiendo del componente en cuestión, es probable que se forme antes de que la válvula de escape se abra, pero algunas conversiones de gas a partículas en el sistema de salida no están descartados; las fracciones sulfatas y orgánicas, siendo las más volátiles, son formadas al final, quizás en la parte más fría del sistema de escape, al final de este obviamente, o más probablemente, en la pluma de escape o en el túnel de dilución.

1.1.2.1 Fracción carbonosa

La fracción carbonosa del MP, o BC, está formada principalmente de carbono elemental, también llamada carbono inorgánico. Este carbono es dispersado como BC, que es el responsable de la emisión de humo negro. La fracción de carbono en el MP se forma debido a una combustión heterogénea en motores diésel, donde las partículas sólidas se forman tanto con llama de difusión, como con llama de premezcla.

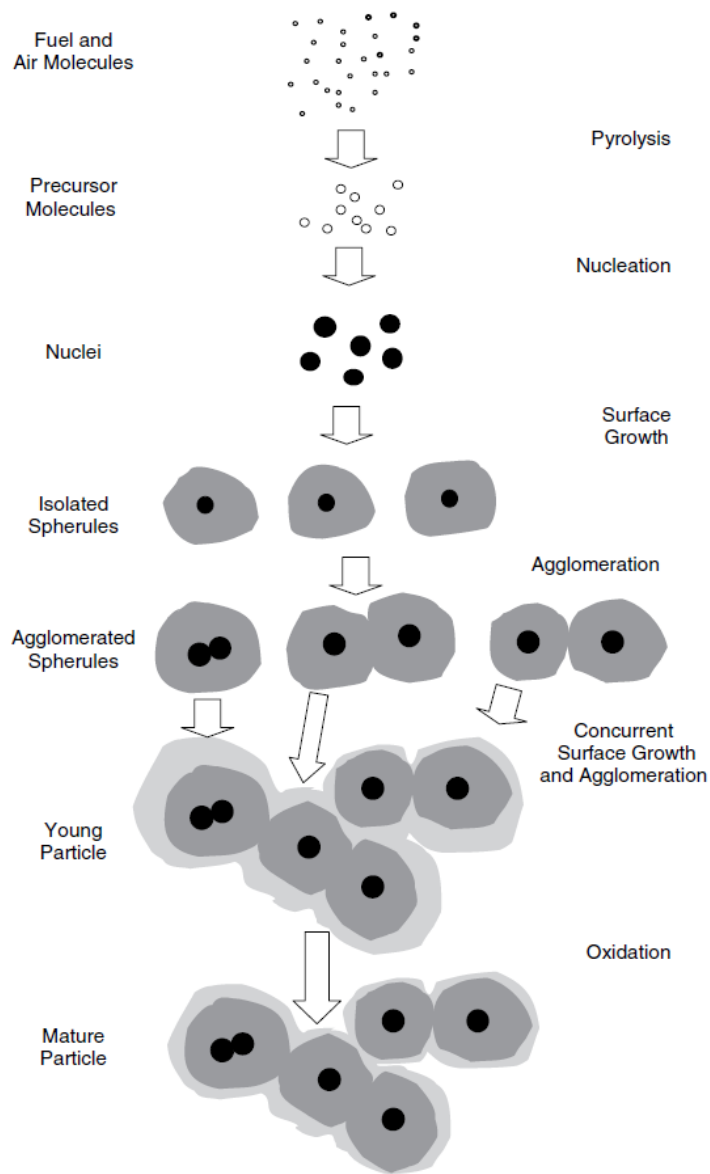


Ilustración 1.5 Esquema conceptual de la formación del BC.[12]

La formación de BC es un proceso en el cual las moléculas de combustible, que contienen entre 12-22 átomos de carbono y el doble de átomos de hidrógeno, son convertidas en unos cuantos milisegundos en esférulas, que contienen miles de átomos de carbono y una décima parte de átomos de hidrogeno. El esquema más sencillo y global de reacción, empieza con el combustible y el oxígeno, y termina con dióxido de

carbono, hidrogeno y carbono. Apunta a una relación crítica de aire-combustible en donde el BC aparecería; pero, en la práctica, esta relación no es derivable analíticamente, y no es universal: varía con la naturaleza del proceso de combustión como con la composición del combustible, la mezcla de aire con el combustible, y con la estructura de la llama.

Como otros antecedentes tenemos que el BC es la fracción del MP atmosférico que es insoluble en solventes polares y no polares; es estable en una atmósfera de oxígeno puro hasta una temperatura de 350 °C; muestra líneas espectroscópicas de Raman típicas de estructuras grafíticas y microcristalinidad; es fuertemente absorbente en el espectro visible. [19]

El BC es un componente básico presente en el aerosol atmosférico, que tiene su origen en los procesos de combustión incompleta. Según el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2013) el BC es el segundo agente, después del CO₂, que más influye en el calentamiento del sistema terrestre, siendo una pieza fundamental entre aquellos elementos que participan en el balance radiactivo terrestre. Este componente está presente en la atmósfera en tamaños que varían dentro del rango nanométrico, por lo que supone una seria amenaza para la salud humana, ya que puede provocar efectos adversos de diferente tipología, al introducirse por inhalación en el cuerpo humano, pudiendo llegar hasta el torrente sanguíneo.

El BC representa uno de los principales componentes del aerosol atmosférico en áreas sometidas a la influencia de procesos de combustión, al ser generado por algunas de las principales fuentes antropogénicas que utilizan estos procesos (tráfico, generación de calor y agua caliente en instalaciones de combustión, cocinas domésticas, instalaciones industriales, generación de energía, entre otros). Este contaminante presenta una serie de propiedades características y específicas, que en gran parte

contribuyen a su definición: propiedades ópticas (capacidad de absorción de la luz), y físicas, en cuanto a su tamaño y forma, que permiten su identificación y la utilización de técnicas de medida basadas en dichas propiedades. [1]

Químicamente el BC, que no debe confundirse con el negro de carbón³, es un componente fino del MP (PM 2.5 en diámetro aerodinámico). El BC consiste en carbono puro en varias formas vinculadas. Es formado por la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa, y es emitido por las dos fuentes que generan BC, las antropogénica y las naturales. BC causa mortalidad prematura en los humanos.

En la climatología es un agente de cambio climático. El BC calienta la tierra como consecuencia de que este absorbe la luz del sol y calienta la atmosfera, además de reducir el albedo⁴ cuando se deposita en la nieve o el hielo (efecto directo), e indirectamente al interactuar con las nubes. El BC se queda en la atmosfera desde días hasta semanas.

³ El negro de carbón es un material producido por la combustión incompleta de los productos derivados del petróleo. Es una forma de carbono amorfo con una relación superficie-volumen extremadamente alta y que como tal es uno de los primeros nanomateriales ampliamente usados. Es parecido al negro de humo salvo por su elevada relación superficie-volumen. El negro de carbón se usa a menudo como pigmento y como refuerzo en productos de goma y plástico.

⁴ El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.

Empíricamente

Debido a la gran complejidad de la formación del BC, que involucra cientos de reacciones emergentes, los investigadores han adoptado una relación empírica y global: por ejemplo, el BC ha sido relacionado con la fracción de combustible quemado en la fase de mezcla controlada, la temperatura de combustión, y ciertos aspectos de la liberación de calor, mientras otros, modelos semi empíricos, usa la relación de Arrhenius⁵, que también son muy reconocidas. [18]

Origen

Las partículas de BC son creadas por el proceso de ‘inception’, la naturaleza de este proceso sigue sin entenderse completamente, pero en general, los hidrocarburos del combustible se rompen por reacciones pirolíticas y se reagrupan en moléculas aromáticas; esto implica la ciclación⁶ de moléculas alifáticas, y la aparición de benceno, la molécula base que las constituye. Las moléculas aromáticas siguen creciendo, en el cual el acetileno actúa como materia prima. Carbono es incorporado, y el hidrogeno es removido, en el llamado mecanismo de ‘extracción de hidrocarburos y adición de carbono’ (HACA). Pasando el límite entre gas a partícula es el aspecto con menor noción en la ‘inception’; algunas ideas de esto involucran macromoléculas, iones, partículas introducidas por medio del aire y fulleneros⁷. La primera partícula

⁵ La ecuación de Arrhenius es una expresión matemática que se utiliza para comprobar la dependencia de la constante de velocidad (o cinética) de una reacción química con respecto a la temperatura a la que se lleva a cabo esa reacción.

⁶ Ciclación: cuando pasa de una cadena lineal a una cíclica, por ejemplo, la glucosa.

⁷ Un fullereno (también, fulereno) es una molécula compuesta por carbono que puede adoptar una forma geométrica que recuerda a una esfera, un elipsoide, un tubo (llamado nanotubo) o un anillo. Los fullerenos son similares al grafito, compuesto de hojas de anillos hexagonales enlazadas, pero conteniendo anillos pentagonales y a veces heptagonales, lo que impide que la hoja sea plana. Los fullerenos son la tercera forma molecular estable conocida de carbono, tras el grafito y el diamante.

perceptible, o núcleos, son de aproximadamente uno a dos nanómetros en tamaño, y contienen de unas cuantas hasta cincuenta átomos de carbón; estas existen en números masivos, pero la masa total de BC sigue siendo pequeña.

Crecimiento de superficie

El BC suplementario es ahora depositado alrededor de estos núcleos en un proceso de crecimiento de superficie, esto posteriormente crea las esférulas. El crecimiento de superficie incrementa en gran medida la masa total del BC., pero deja sin alterar el número de partículas. Las esférulas crecen hasta cierto rango de tamaños, de 20-50 [nm], y luego se detienen. El porqué de las esférulas se mantienen en un rango tan acotado se mantiene sin saber; algunas finalizaciones del proceso de crecimiento parecieran trascender a detalles específicos de la combustión. El crecimiento de superficie es el responsable de la microestructura estratificada, en el que los cristalitos son ordenados concéntricamente alrededor de la esférula. Esta capa difiere notoriamente de la estructura del centro de la esférula, la desordenada, o amorfa, estructura en la que se piensa que traiciona su núcleo progenitor.

Aglomeración

Las esférulas se aglomeran ávidamente, esto es, que ellas colisionan vigorosamente y se adhieren a otras; y, en este proceso de crecimiento, que es más bien físico y luego químico, el número de partículas disminuye, pero la masa de BC se mantiene constante. Algunas aglomeraciones ocurren cuando las esférulas están recién formadas, y alquitranadas o con una consistencia fluida, por eso se observa de un tono oscuro; la coalescencia explicaría las instancias en que varios núcleos son encontrados dentro de la misma esférula. Pero inclusive en la ausencia de fusión, el aumento de superficie sigue apareciendo, de modo que se desarrolla una estructura compartida con enrejados

superpuestos, por lo cual los límites originales están oscurecidos. Agrupaciones o morfologías encadenadas son desplegadas, de acuerdo con la naturaleza de las colisiones que generan los aglomerados.

Oxidación

Más del 90% del BC recién formado es oxidado inmediatamente dentro del motor, previamente a la emisión. Existe debate en torno a quien es el responsable de la oxidación, esto es porque no es solamente el O_2 , sino también el O , OH , CO_2 o el H_2O : esta pregunta depende de la localización en la cámara de combustión y del momento en el proceso de combustión. La mecánica del fluido en la cámara de combustión, en la medida en que esto controla el mezclado de aire y BC, y el movimiento de la nube de BC, son también importantes. La oxidación de las esférulas se supone que generalmente está limitada cinéticamente, y para tomar lugar en la superficie, según lo visto por el retroceso de la superficie. Las evidencias dicen, también, que algunas oxidaciones tomarían lugar dentro de la esférula.

1.1.2.2 Fracción carbonosa: Pluma de combustión

Si bien ya introducimos en el capítulo 1.1.2.1 la composición de la fracción carbonosa de forma empírica, su formación misma, el crecimiento de su superficie, la aglomeración y oxidación de este, en esta sección se aborda un tema interesante sobre la fracción carbonosa que es lo que pasa con la pluma de combustión característica de los motores de combustión interna y como se relaciona con el BC. Además, el segundo tópico a estudiar en esta sección es su interacción con las paredes.

Si bien en la sección previamente mencionada fue una discusión generalizada de la formación del BC, esta estaba enfocada en varias formas de combustión, en cambio

esta sección sigue lo que pasa dentro del motor diésel. Comenzando con el proceso de combustión, y acorde a varias técnicas experimentales, la distribución espacial-temporal del BC.

Siguiendo el inicio de la combustión, la cantidad de BC dentro del cilindro aumenta rápidamente, alcanza un máximo y luego, a una tasa gradualmente decreciente, disminuye, para alcanzar, eventualmente, y de hecho asintóticamente, los niveles observados en el sistema de escape. Este patrón tiende a traicionar el balance cambiante entre los niveles de la formación de BC y la oxidación de este. El primero (formación de BC) es favorecido en las primeras etapas, el segundo (oxidación) en las etapas posteriores; estos dos procesos son de igual importancia a la hora de determinar qué es lo que saldrá del motor. La formación y la oxidación están distintamente afectadas por los parámetros de operación del motor (por ejemplo, EGR, tiempo de inyección y la presión de inyección), y por lo tanto el efecto de limpieza no es siempre obvio: la formación de más BC, como lo indica un mayor máximo, puede ser compensado por una oxidación más vigorosa, que en ese caso sería una salida de BC menor del motor.

Llama premezclada

Las primeras partículas de BC se piensan que se forman durante la premezcla, en la zona mejor mezclada de aire y vapor de combustible, hacia la cara principal de la pluma de combustión. Este BC aparece virtual y simultáneamente en múltiples focos, con la cual toda la región es rápidamente impregnada. El BC formado en esta fase de la combustión pareciera improbable, sin embargo, contribuye mucho al total de la emisión. Durante la transición hacia la fase de mezcla controlada, las partículas del BC surgen, no dentro de la pluma de combustión, sino en la periferia. Estas partículas periféricas son más largas que las formadas en el interior, y se piensa que se forman en

la llama de difusión que ahora está envuelta en la pluma de combustión. Sin embargo, estas partículas se piensan que no son las predominantes en la emisión de BC.

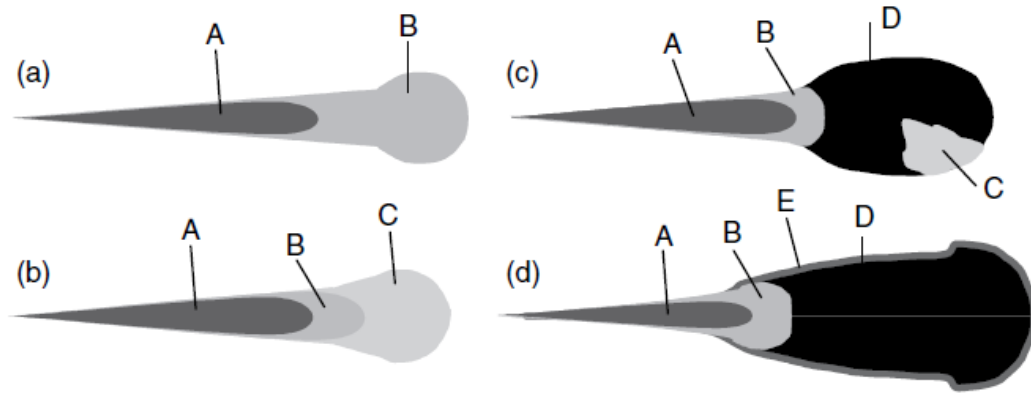


Ilustración 1.6 Modelo conceptual del desarrollo del penacho. [12]

En la Ilustración 1.6 se muestra cual es el comportamiento de la llama premezclada: (a) vemos como es inmediatamente antes de la ignición; (b) justo después de la ignición; (c) una fase temprana de la llama premezclada; (d) fase tardía de la llama premezclada. Además de las etapas la llama presenta las siguientes secciones: A, combustible líquido; B, vapor de combustible; C, PAH; D, una baja concentración de BC; E, envoltura de llama de difusión. [10]

Llama de mezcla controlada

La gran parte de la emisión de BC probablemente surja no de la periferia de la pluma si no del interior de la pluma misma. El modelo conceptual de la combustión del diésel actualmente está ganando una amplia aceptación, el cual afirma que, durante la combustión de la mezcla controlada, la formación de BC ocurre en mayor medida, en la llama premezclada que está en un punto muerto de la boquilla del inyector. Estas partículas de BC luego crecen a medida que atraviesa el tallo o columna de la pluma de combustión hacia la cabeza del vórtice (Ilustración 1.7), donde son quemadas en la llama de difusión envolvente. La concentración de BC y el tamaño de partícula incrementan en consecuencia de la distancia a lo largo de la pluma, pero, en cualquier sección transversal en particular, ambas características parecieran ser aproximadamente constantes.

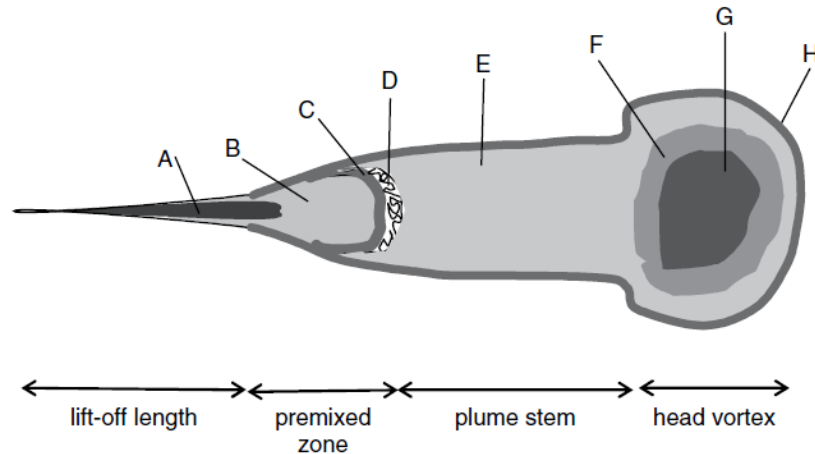


Ilustración 1.7 Llama mezcla controlada.

La Ilustración 1.7 muestra el modelo conceptual de la combustión durante la fase de mezcla controlada: A, combustible líquido; B, mezcla de vapor de combustible y aire;

C, llama premezclada rica en combustible; D, formación inicial de BC; E, F, G, en orden creciente de concentración de BC; H, envoltura de llama de difusión. [10]

Combustión tardía

Una incapacidad para combustionar todo el BC dentro de la pluma es una de las principales razones de la emisión de BC del motor. Después del término de la inyección, la pluma de combustión colapsa, y la cabeza del vórtice se fragmenta en numerosos focos llenos de BC. La llama de difusión, por un instante, continúa rodeando estos focos o paquetes llenos de BC, pero ellos son sofocados y enfriados prematuramente antes que el BC esté completamente consumido, al tener una temperatura de masa demasiado baja no permite soportar una oxidación adicional. Entonces este BC sobrevive hasta que las válvulas de escape se abren.

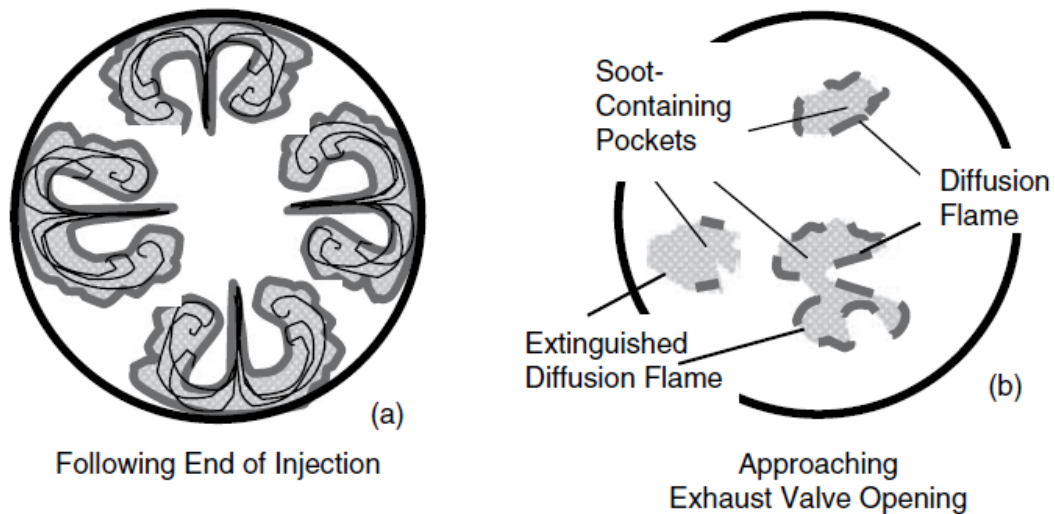


Ilustración 1.8 Pliegue y colapso de la pluma de combustión. [11]

1.1.2.3 Fracción carbonosa: Interacción con las paredes

Las interacciones entre la pluma de combustión y las paredes que la rodean son un aspecto significativo de la formación del BC. Las paredes son considerablemente más frías que la masa de gas; por lo tanto, el BC que se deposita exitosamente en ellas escapará de la oxidación, con una posibilidad de ser arrastrados nuevamente una vez que las temperaturas caigan. La termoforésis está bien descrita como el principal mecanismo de deposición en las partículas transportadas a través de la capa límite. La trayectoria y la duración de la pluma de combustión con respecto a la pared son factores importantes en llevar partículas dentro de las cercanías de la pared. El grosor del depósito en la pared probablemente se ajuste en línea con el punto de operación del motor. Los depósitos de BC se forman rápidamente, quizás linealmente, de una condición limpia; el índice de deposición luego se nivela gradualmente. Las mediciones del BC en el escape no tienen una clara relación con la deposición del BC; de hecho, el efecto pareciera ser impredecible: EGR y el tiempo de inyección, por ejemplo, tienen un fuerte impacto en la formación de BC, pero un efecto débil en la deposición. El BC depositado permitiría a la flama acercarse a la pared, por ejemplo, si el oxígeno se da desde dentro de su estructura porosa o si la transferencia de calor hacia la pared se ve reducida. Mejor que promover la quema de los depósitos que se dan lugar, una mejor estrategia sería desalentar la deposición.

1.1.2.4 Fracción de cenizas

Reacciones químicas

La fuente de la fracción de cenizas son principalmente los lubricantes, el aire, el desgaste y el combustible. La fuente más estudiada es el combustible. Los compuestos inorgánicos y orgánico-metálicos son desglosados, y sus metales probablemente

vaporizados en la combustión. Las estabilidades térmicas y oxidativas de estos componentes con respecto a aquellos hidrocarburos del combustible son supremos. Los componentes químicos formados por los elementos de las cenizas son escasos, pero deben, inevitablemente, cambiar para condiciones más frías; el equilibrio termodinámico sugiere óxidos, hidróxidos y sulfatos. La presencia de azufre debe ser un factor. Dado esto, de todas formas, el rápido enfriamiento, con estados desequilibrados son probablemente la norma por seguir.

Conversión de gas a partícula

Las formas químicas que toma el material inorgánico determinan el momento o temperatura en que se convirtió de gas a partícula. Y este momento, con respecto a la aparición de las esférulas, es especialmente importante: los elementos de las cenizas son dispersadas atómicamente dentro de las esférulas; atrapadas dentro de las esférulas siendo ‘ocluidas’; se ubican dentro del dominio de la superficie de la esférula o bien se presentan como partículas nucleadas separadas.

1.1.2.5 Fracción Orgánica Soluble (SOF)

Reacciones químicas en el motor

Los componentes del combustible que logran escapar de la combustión dan directamente origen al particulado orgánico; y los componentes del combustible que están parcialmente rotos, y luego son sintetizados en nuevos componentes, contribuyen indirectamente al particulado orgánico. Esta última ruta existe debido a que la fracción orgánica es, en efecto, la materia prima de la fracción carbonosa, y debido a que las reacciones en la formación de BC son prematuramente interrumpidas; esto se conoce con el nombre de ‘orgánicos intermedios’. La presencia de componentes nativos del

combustible y de componentes sintetizados de la combustión desmiente la suposición de que las emisiones de particulado son simples reflejos de componentes del combustible no quemados. Existen tres campos de investigación de relevancia que describen los orgánicos intermedios. El primero, estudios de ‘supervivencia’, especiación comparativa, la cual, a pesar de la confusión por los depósitos de dentro del motor y el aceite, sugieren que los compuestos del combustible, en lugar de los componentes piro-sintetizados, predominan en la fracción orgánica. La segunda, llamas del laboratorio, las cuales contienen una intermedia o zona oscura entre el combustible no quemado y las esférulas emergentes, dentro del cual misteriosas ‘proto-partículas’ son encontradas, la naturaleza de estas es de carácter orgánico y alquitranado. Y el tercero, experimentos en horno, en el cual los hidrocarburos son sometidos a altas temperaturas en atmósferas inertes y, en el efluente en el cual las emisiones de particulado cambian con respecto a la temperatura, de orgánico a carbonoso, de fluido a sólido, y de amarillo a negro. A partir de la consideración de estos tres campos, resulta posible explicar una tendencia ampliamente observada en la emisión de particulado de un motor diésel: húmedos u orgánicos a bajas cargas y secas o carbonosas para cargas altas. En cargas bajas, la temperatura es insuficiente para impulsar o energizar las reacciones pirolíticas que llevan a la formación del BC, por lo que los orgánicos intermedios son emitidos en su lugar. La formación de BC se ve interrumpida por el enfriamiento con la pared y enfriamiento por bulk, y porque la descomposición del combustible es lenta.

Reacciones químicas en el escape

Las reacciones químicas no cesan una vez que el gas de escape deja la cámara de combustión: PAH, especialmente, siguen siendo modificados a sorprendentes bajas temperaturas, 250 °C. Este límite es, sin embargo, difícil de definir. Es, por lo tanto, difícil estimar las emisiones del tubo de escape simplemente extrayendo muestras del

sistema de escape. Las sucesivas reacciones químicas que ocurren en el sistema de escape hacen creer que sustentan la conversión de PAH a NPAH más mutagénicos, aunque la vía de nitración está poco documentada, y reacciones auténticas son pobremente reconocibles de los artefactos.

Conversión de gas a partícula

La mayoría de las conversiones de gas a partícula en la fracción orgánica suceden muy tarde en el proceso de emisión, esto es en la pluma de escape o en el tubo de dilución. Los modelos sugieren adsorciones y desorciones⁸ dominando esta transferencia, en lugar de condensaciones y evaporaciones. La condensación puede volverse importante cuando los hidrocarburos son emitidos a altas concentraciones comparadas con el BC, por ejemplo, después de pasar por el DPF. Como está equilibrada esta conversión de gas a partícula sigue pobremente explorada; y se reconoce como defecto en los modelos actuales la ausencia de factores cinéticos.

Las mediciones efectuadas con el FID, opera a distintas temperaturas y a diferentes puntos en el sistema de escape, para rastrear la transferencia de hidrocarburos a la fase de particulado coincide razonablemente bien con la cantidad de particulado orgánico encontrado al final en el filtro del tubo de dilución. Pareciera que la mayoría de los hidrocarburos, cuando están en el tubo de escape, permanecen en una fase gaseosa, y estos, consecuentemente, son oxidados producto de los catalizadores independiente del

⁸ La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen. El proceso inverso a la adsorción se conoce como desorción.

transporte de partículas, esto es que las partículas no actúan como portadores de estos hidrocarburos.

Humo blanco

El humo blanco aparece siempre que la fracción orgánica (principalmente combustible no quemado) excede considerablemente a la fracción carbonosa. En efecto, la nucleación a gotitas es inevitable cuando el área de la superficie del sólido se ve abrumada; la concentración de hidrocarburos en este instante alcanza los miles de ppm. Partidas en frío y ambientes helados, a medida que aumentan la saturación, son factores que exacerban esta condición. Las causas fundamentales del humo blanco, sin embargo, son los largos retrasos en la ignición y las bajas temperaturas en el cilindro, que permiten que la atomización del combustible impacte en las paredes de la cámara de combustión, provocando que se acumule una película o capa de combustible líquido; luego, cuando el motor comienza a calentarse, esta película de combustible combustiona inapropiadamente, y escapa de la combustión. Las propiedades más relevantes del combustible son el índice de cetano⁹ y el T90¹⁰. Aunque el humo blanco se equipara a “gotas de combustible”, estrictamente hablando, cualquier suposición a priori de la identidad con el combustible parece injustificada, porque las reacciones de combustión parcial y el almacenamiento dentro de los motores son selectivos en sus efectos sobre la especiación de hidrocarburos. Las mediciones significativas del humo

⁹ El número o índice de cetano guarda relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión, denominado “Intervalo de encendido”. Una combustión de calidad ocurre cuando se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante.

¹⁰ El término "T90" en relación con los combustibles se refiere al punto de ebullición al cual el 90% del volumen del combustible se evapora.

blanco son imposibles sin un control adecuado de la saturación y de la conversión de gas a partícula.

1.1.2.6 Partículas Sulfatadas (SO₄)

Reacciones químicas

Los sulfatos llegan durante el escape del gas por parte del combustible y el aceite. Es emitido por el motor como SO₂, En la ausencia de un catalítico, un pequeño porcentaje de genera como SO₃. El equilibrio termodinámico favorece al SO₂, pero esta conversión está limitada cinéticamente. Consecuentemente, los sulfatos fueron un impedimento significativo a la hora de implementar los catalíticos de oxidación, la molesta acción de estos es convertir el SO₂ en SO₃. Es también posible, hasta cierto punto, que existan partículas (especialmente metálicas) que catalicen, la conversión de SO₂ en SO₃. El problema realmente es el SO₃, como esto prontamente se somete a hidrólisis¹¹ y forma ácido sulfúrico, H₂SO₄; y este ácido, en cambio, prontamente experimenta una conversión de gas a partícula. El ácido sulfúrico cambia el punto de rocío, por lo que la condensación ocurre a temperaturas más elevadas, en consecuencia, más tempranamente en el sistema de escape. Un gramo de sulfuro forma tres gramos de H₂SO₄, sin contar el agua adicional de hidratación. Los químicos SO_x pueden acoplarse, eventualmente, a los químicos NO_x, pero este aspecto no se ha estudiado tan bien.

¹¹ Hidrólisis es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química.

Conversión de gas a partícula

El ácido sulfúrico es un instigador de la creación de partículas por medio de la nucleación; esto lo hace actuando en presencia de agua, como se describe por la teoría de la nucleación binaria homogénea (BHN). Aun así, el BHN no es un modelo lo suficientemente predictivo, hay otras ideas tomadas de estudios de sistemas de escapes de aviones jet, que sugieren una forma de nucleación con mediadores de iones (IMN). Siguiendo la aparición de estos núcleos de sulfatos, se cree que los compuestos orgánicos son los que asumen como las principales especies que se expanden.

1.1.2.7 Tamaño de las partículas

La distribución de tamaños en las partículas diésel posee un carácter bimodal, los cuales tienen máximos de concentraciones tanto en el modo de nucleación como en el modo de acumulación. El modo de nucleación, en lo que se refiere a distribución másica, es insignificante. En cambio, en lo que respecta al número de partículas, representa más del 90% del total de partículas. Además, se cree que el modo de nucleación de las partículas para vehículos diésel está compuesto principalmente por líquidos condensados, no por sólidos, por lo que debieran tener un efecto menos cancerígeno en los pulmones. Sumado a esto, las partículas más pequeñas tienen un tiempo de vida en la atmósfera muy corto. Se ha encontrado una reducción del 90% de concentración de partículas (en número) en unos pocos segundos a una distancia de entre 100 a 1000 m. [6]

Al contrario de la masa de las partículas, la distribución de tamaño de las partículas está muy lejos de ser estandarizada. Esto ocurre debido a la variedad en las técnicas de medición y a las diferencias en las muestras. Más adelante se analizarán los distintos factores que influyen en la muestra de particulado.

El MP atmosférico es dividido en las siguientes categorías, basadas en el diámetro aerodinámico¹²:

- MP10 (partículas que tienen un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm).
- Partículas finas con diámetros menores a 2.5 μm .
- Partículas ultrafinas con diámetros menores a 0.1 μm o 100 nm.
- Nano partículas, que se caracterizan por tamaños menores a 50 nm.

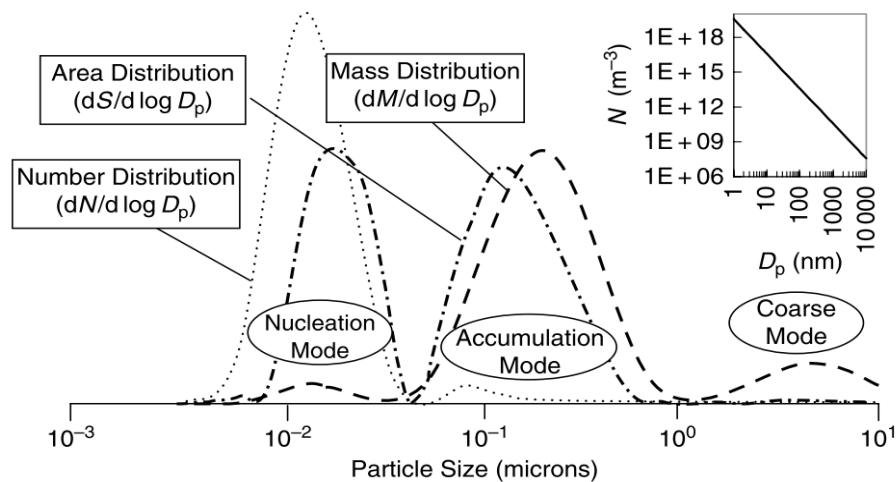


Ilustración 1.9 Distribución de tamaño de partículas emitidas por un motor de combustión interna: en función de su número, superficie y masa.

1.1.3 Formación del MP (localización)

En este capítulo la formación será estudiada un paso más allá, pero hablando de la composición de las partículas al mínimo, se hará énfasis en la localización de la

¹² El diámetro aerodinámico equivalente es el diámetro de una esfera de unidad de densidad (1 gr por cm^3) que tiene la misma velocidad de sedimentación en el mismo gas. Las partículas con el mismo DAE se comportan dinámicamente igual.

partícula, o poniéndolo de otra forma, el momento de la aparición en el proceso de emisión. Este capítulo está dividido de acuerdo con la ruta que toman los gases de escape en el proceso de emisión; para el caso del mundo real, esto es a través del sistema de escape y hacia el aire ambiental, y, la otra situación es la del laboratorio, que es a lo largo de una línea de transferencia y dentro de un túnel de dilución, terminando con un filtro del túnel de dilución. Como la fase de particulado se ve afectada de muchas maneras por este recorrido, las diferencias en la caracterización surgen inevitablemente entre estos dos tipos de emisión.

1.1.3.1 Dentro del sistema de escape

La expulsión de los gases de escape del motor está caracterizada de dos formas marcadamente distintas, una es función del ángulo del cigüeñal (CA), dos fases consecutivas: ‘purga’, o expulsión por medio de la liberación de la presión del cilindro, y el ‘desplazamiento’, o expulsión por el movimiento hacia arriba del pistón¹³ [7] [15] [21]. Estas dos fases están fijas en todas las emisiones, y en el particulado no es la excepción: esta evidencia ha sido reunida por los filtros en el gas de escape, y por las mediciones de dispersión de luz como función del ángulo del cigüeñal, a pesar de que en general la aplicabilidad de estos hallazgos es incierta, ya que esta pobremente estudiada. Algunos datos sugieren que las partículas expulsadas en cada una de estas dos fases son de una naturaleza distinta, por ejemplo, en términos de sus componentes volátiles o su tamaño. No surge ninguna visión general de las transformaciones del particulado a través del sistema de escape; pero la acreción de los volátiles es observada una vez que las temperaturas descienden por debajo de los 300 °C, con probables efectos en la morfología de la partícula; la conglomeración no pareciera influenciar, al

¹³ Uno debería tener en mente el posible efecto de dilución provocado por la superposición o solapamiento de válvulas.

final en el modo de acumulación; y la oxidación a altas temperaturas podrían causar la fragmentación de la partícula.

Almacenamiento y liberación

Las partículas se alojan rápidamente dentro del sistema de escape y se acumulan como depósitos en la pared, y estos depósitos pueden, de acuerdo con el ciclo de trabajo al que es sometido, ser liberados como ráfagas repentinas. Las partidas en frío, debido a las intensas fuerzas radiales termoforéticas¹⁴, particularmente estimula la deposición. A altas velocidades de flujo la deposición se ve estimulada por el impacto inercial, pero también contribuye en la exfoliación de estos depósitos por las fuerzas del cizallamiento del fluido. La acumulación en el sistema de escape solo no se entiende en esta manera cuantitativa; la naturaleza impredecible y aleatoria de liberación constituyen un obstáculo para el modelado.

¹⁴ La termoforesis (también termodifusión, termomigración, efecto Soret, o el efecto Ludwig-Soret) es un fenómeno que se observa en mezclas de partículas en movimiento donde los distintos tipos de partículas exhibidos responden a la fuerza del gradiente de temperatura.

Depósitos en el catalítico

La deposición de las partículas en las paredes de los canales del monolito cerámico es modelada exhaustivamente, el flujo a través de estos canales es laminar, pero las partículas no se quedan necesariamente fieles a las líneas de corriente. Los modelos sugieren que las partículas en modo de nucleación son captadas por difusión, y las partículas en modo de acumulación por termoforésis; otros mecanismos de deposición no son relevantes. Los modelos deben abarcar la conducción en el transiente, como las fuerzas termoforéticas pueden de hecho cambiar la dirección, dependiendo, por ejemplo, de la inercia térmica del monolito.

1.1.3.2 Dentro de la pluma de escape

En las plumas de escape reales, las que van directamente a la atmósfera luego de pasar por el sistema de escape, el gas de escape es diluido, de una forma lineal o cercana a lo lineal, por un factor de dilución de varios cientos en menos de un segundo. Tal rapidez de dilución proporciona pocas oportunidades para el equilibrio entre la fase gaseosa y la fase particulada. El descubrimiento más significativo en los años recientes viene de los experimentos de persecución, en los cuales las muestras de gas de escape diluidas son extraídas de las plumas de escape ‘en movimiento’. Estos experimentos demuestran que las nanopartículas no son, como algunos argumentan, artefactos de los laboratorios de dilución, sino que están presentes en las plumas de escape reales. Esta nucleación dentro de la pluma también sigue las tendencias esperadas si la saturación es el factor decisivo, por ejemplo, más nanopartículas son vistas sobre una dilución en ambientes más fríos o húmedos.

1.1.3.3 Dentro de la línea de transferencia

Este lugar es donde primeramente el gas experimenta una condición artificial, y esta artificialidad tiene profundas ramificaciones para la caracterización del particulado, especialmente la demográfica (que se explica en 1.1.4.3). Las partículas se pierden en las paredes, a través de la difusión¹⁵ y la termoforesis, siendo estos dos los más probables. La mejor estrategia para evitar estos artefactos es minimizando el tiempo de estadía dentro de la línea. Los aspectos más extensamente estudiados de la línea de transferencia en los años recientes es la nucleación: este modo puede resultar irreproducible en gran parte, debido a la influencia de la historia de la prueba, efectos de la continuidad, y el patrón de aumentos de temperaturas y caídas de esta. Estas discrepancias han sido seguidas a las paredes de la línea de transmisión, que las ocupan y luego se sueltan, o se desgasifican, son precursores del particulado (volátiles); estos volátiles aumentan temporalmente la saturación, causando la nucleación. Algunos materiales de ingeniería también desgasificarían el material volátil. Ya que estos artefactos pretenden imitar el comportamiento de las emisiones, por ejemplo, como las decisiones de aceleración o variación de velocidad del vehículo, los resultados de los ensayos para el modo de nucleación pueden resultar doblemente engañosos.

¹⁵ La difusión (también difusión molecular) es un proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente, aumentando la entropía (Desorden molecular) del sistema conjunto formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disuelven.

1.1.3.4 Dentro del túnel de dilución

Los modelamientos más detallados del transporte de partículas en el tubo de dilución apuntan a una termoforésis como el mecanismo que predomina en la deposición en las paredes por el modo de acumulación; por consiguiente, las mediciones de masa se ven más afectadas. Las pérdidas por difusión se vuelven importantes por debajo de los 100 [nm], con un esperado impacto en el modo de nucleación y en las mediciones del número de partículas. Históricamente solo ha sido el factor de dilución final, el alcanzado en el filtro del tubo de dilución, el que importaba. Sin embargo, una extensiva cantidad de datos muestran que el perfil de dilución, esto es el patrón de mezclado y enfriamiento en tránsito a lo largo del túnel, es particularmente influyente en la velocidad de dilución. Varios grupos de investigación han diseñado aparatos que investigan la interacción del factor de dilución con el factor de saturación. Muchas especies parecen aumentar su máximo de saturación cuando el factor de dilución está entre 5 y 50; el periodo de tiempo ocupado en la transición a través de esta región es por lo tanto importante. Una pregunta importante, pero sin respuesta es si el equilibrio total surge entre la fase gaseosa y la fase particulada. La nucleación es observada en el túnel de dilución – esto podría suceder casi de inmediato al momento que el gas de escape deja la línea de transmisión, pero, debido a la susceptibilidad sutil de la razón de nucleación a la saturación, se ve difícil rastrear el punto al cual se forman las nanopartículas.

1.1.3.5 En el filtro

El filtro del túnel de dilución no es una buena referencia al momento de decidir o discriminar que es ‘particulado’. Es la eficiencia de filtrado la que aumenta inevitablemente en el curso de ensuciamiento, porque las partículas retenidas forman un filtro muy efectivo en sí. La presión cae en el filtro y también aumenta, y esto podría

ocasionar que las especies volátiles se unan a otras volátiles y se fuguen. Los volátiles ciertamente se pierden del filtro cuando la temperatura aumenta, como sucede durante la operación del motor en el transiente. Tales fenómenos en tiempo real, sin embargo, son una parte esencial en el resultado acumulativo final del ciclo. Comportamientos no ideales en el filtro distorsionan las mediciones de la eficiencia de captura de partículas por los dispositivos de postratamiento. Como los volátiles pueden pasar el filtro, estos están totalmente cuantificados mediante la incorporación de un absorbente, o una trampa de vapor. Un escenario artificial es creado en el filtro, que en efecto es un reactor químico, porque el particulado se deposita en un lugar donde está a una mayor temperatura y por largos periodos que en una condición normal.

1.1.4 Caracterización

En los capítulos 1.1.2 y 1.1.3 describimos como las partículas eran generadas y en qué momento eran formadas, esto forma el complemento necesario, y de hecho telón de fondo, para el presente capítulo, que describe como las partículas son compuestas, por lo tanto, en lugar de lo que se forma, pasamos ahora a lo que se encuentra: y esto, es la esencia de la caracterización. Obviamente esta información es esencial para catalogar apropiadamente las ramificaciones ambientales de estas nefastas emisiones. Pero, menos obvio, los estudios de caracterización proveen importantes pistas de como las partículas son formadas: se podría argumentar, por ejemplo, que, si alguna característica u otra se observa, entonces un mecanismo más que otro debe haber sido el responsable; y esto, a su vez ayudaría a sugerir vías en las cuales las emisiones de MP podrían ser abatidas. Menos obvio aún la caracterización ayudaría a diseñar aparatos de laboratorios capaces de generar partículas artificiales [16], cuyas características cual, naturalmente, reproducen aquellas de las emisiones reales. Estos aparatos obviarían la necesidad de requerir de costosas instalaciones que usan las pruebas de motores; permitiría controles más precisos, y mejores repetitividades; y la necesidad de aerosoles de calibración.

El estudio de la caracterización se describe en 4 secciones. La física que engloba la microestructura de las esférulas y la morfología de las ‘superestructuras’ construidas de estas esférulas, llamados aglomerados. La caracterización química engloba la distribución de composición de las 4 fracciones: carbonosa, sulfatos, orgánica y cenizas. La caracterización biológica, se refiere exclusivamente a la mutagenicidad bacteriana. Y por último la demográfica.

1.1.4.1 Caracterización física

Antes de pasar a la caracterización física mencionaremos que a medida que la presión del tubo de dilución disminuye, podemos asegurar que está relacionado con la masa que este filtro retiene. La presión disminuye en función de las características físicas y estas no son constantes.

Tenemos 5 caracterizaciones físicas importantes:

Microestructura

La unidad estructural básica del aglomerado carbonoso hasta el momento es la esférula, que hasta ahora ha sido tratada completamente como una entidad. Descendemos dentro de la esférula para examinar como los átomos de carbono se acomodan adentro y se arreglan.

La comprensión de la microestructura de las esférulas ha cambiado durante los años, pero las controversias no se discutirán en esta sección, por el momento se estudiará un concepto bien aceptado de la microestructura en cuestión, mostrado en la Ilustración 1.10. En orden creciente de escala dimensional, los componentes micro estructurales se componen de los siguiente: (a) los átomos de carbono se arreglan en grupos de a 6 anillos repetidamente, formando hexágonos planos como una ‘colección’; (b) las colecciones hexagonales están unidas químicamente, formando paralelos, con sus caras centradas o ‘plaquetas’; (c) las plaquetas están apiladas, formando comúnmente dominios orientados, o ‘cristalitos’; (d) los cristalitos están apiladas en variadas orientaciones, formando esférulas completas; (e) dos esférulas completas, contienen más de un núcleo, y enlazadas por medio de los cristalitos; (f) micrografía electrónica de un aglomerado; (g) acercamiento del (f).

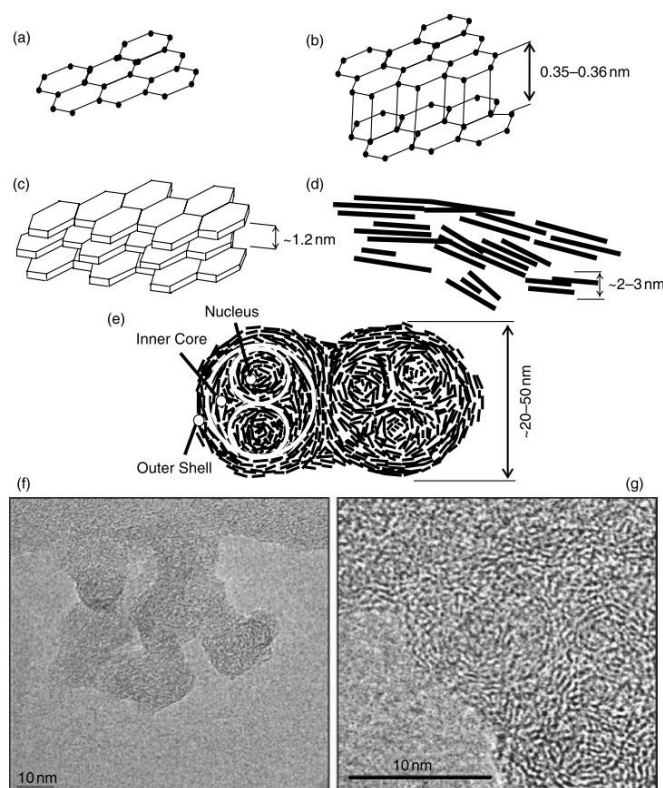


Ilustración 1.10 Microestructura de la esférula.

Morfología

El tamaño de las esférulas se distribuye de acuerdo con una función normal, o parecidas a esta: estas dependen débilmente de la condición de operación del motor. El número de esférulas en un aglomerado dista desde un puñado hasta unos pocos miles. El grado de interconexión exhibida por las esférulas vecinas se cree que revelan estados físicos (alquitranadas o sólidas) en el momento de la colisión. El tamaño de las esférulas no parece tener ni una relación con el tamaño de la aglomeración. Para caracterizar la compleja morfología se usan distintos modelos de procesamientos de datos, hoy en día las investigaciones emplean las últimas ideas sobre la fractalidad. La dimensión fractal no se abordará en esta sección, pero se mostrará como ejemplo (ronda alrededor de 1.8). La fractalidad no es una función de las condiciones de operación del motor. La

esencia de la morfología del aglomerado se disfraza al asimilarse con las sustancias volátiles, especialmente cuando la asimilación es extensa, cambiando la morfología hacia la esfericidad.

Densidad

La densidad de carga no debe confundirse con la densidad efectiva – la última incluye poros llenos de gas y vacíos; las dos son iguales para una esfera perfecta. La fracción de cenizas (compuestos metálicos) puede fácilmente dominar la densidad. Para las partículas de nucleación es más común que se rijan por la densidad de carga. Se estiman rangos entre 0.8 a 2.4 g/cm³, dependiendo del punto de operación del motor, la densidad tiende a decaer con los aumentos de carga del motor, lo que sugiere una tendencia a secarse, a tener estructuras abiertas.

Superficie

Las estimaciones de superficie se basan en simples consideraciones geométricas, es decir, derivadas de las esférulas aisladas ideales, los valores rondan de 100-150 m²/g; algunos experimentos determinan valores que están dentro de este rango, sin embargo, otros son menores. Pero pareciera que casi la totalidad de la superficie esferular está disponible para la fase gaseosa.

Carga eléctrica

La carga propia esta débilmente estudiada en comparación con los otros aspectos de la emisión del particulado. El entendimiento general se dirige a que estas cargas están asociadas al BC. Las partículas podrían llevar varias cargas elementales; la distribución es bipolar; algunas inclusive son neutras. El mecanismo de carga no es

concluyente, por no decir desconocido, pero podría ser ionización química, emisión termoiónica (efecto Edison), carga por difusión por iones de la llama, algunos residuos de la nucleación, electrificación por contacto el efecto termoeléctrico. Los cálculos indican que las distribuciones de carga se detienen cuando las temperaturas de combustión descienden de 1500 K; esto pasa cuando la concentración de iones gaseosos no es suficiente para mantener el equilibrio de Boltzmann.

1.1.4.2 Caracterización química

El foco de esta sección es la caracterización de las formas químicas o componentes. Como tal, las composiciones químicas concuerdan estrechamente con la apariencia física, como se puede ver en la Ilustración 1.2, pero no tan estrechamente. En el cuadro más amplio, las esférulas claramente corresponden a una fracción carbonosa, así como los revestimientos volátiles adheridos a estas esférulas corresponden a la fracción orgánica y sulfatada. En realidad, de igual manera, algunas moléculas o grupos funcionales están enlazados extremadamente fuertes a la superficie; otros elementos están encapsulados dentro de las esférulas; y parte de la materia está dividida entre la fase de nucleación y la fase de acumulación.

Fracción carbonosa: El BC es lo que compone la mayor parte de esta esférula. El carbono predomina, pero la fracción está convenientemente formada por 5 elementos: C, H, O, N, S.

Fracción de ceniza: En esta fracción predominan los metales, por ejemplo: Cromo, Calcio, Cobre, Hierro, Zinc y Sodio; algunos elementos no-metálicos también son encontrados, por ejemplo, Fósforo, Azufre y Cloro. Estos elementos otorgan una considerable micro-heterogeneidad en las esférulas, debido a su gran diversidad. La fracción de cenizas no es emitida en forma consistente: pueden existir oclusiones dentro

de la esférula, en su superficie, y dispersas dentro de las esférulas en una escala atómica; todas son posibles dependiendo de las circunstancias. Similarmente las composiciones que se forman no están bien informadas: hay principalmente óxidos y sulfuros, pero también hay fosfatos, y posiblemente carbonatos, silicatos y cloruros.

Fracción Orgánica: Esta fracción contiene cientos o incluso miles de componentes; pueden también ser formadas como un sistema de 5 elementos: CHONS. La fracción carbonosa y el combustible tienden a unir el radio atómico del carbono al hidrógeno para todas las partículas; la cantidad de componentes orgánicos que se han tomado definen donde se ubica la proporción real, entre estos límites. De acuerdo con el esquema clasificación de las 7 subfracciones¹⁶, algunas sub-fracciones son viscosas y aceitosas; otras son sólidas. La cantidad de oxígeno en la fracción orgánica puede exceder la encontrada en el combustible, sugiriendo la existencia de muchos productos de reacciones parciales, y la síntesis de hidrocarburos oxigenados en la combustión.

Fracción sulfatada: Los ácidos sulfúricos reaccionan con el metal de la fracción de las cenizas, pero donde esto sucede es incierto; sin embargo, se cree que sucede en el filtro del túnel de dilución. Algunos sulfatos no son volátiles o insolubles en agua, el sulfato de calcio aparece más regularmente.

1.1.4.3 Caracterización biológica y demográfica.

Los Estudios de mutagénesis se enfocan exclusivamente en la fracción orgánica. Por lo que el bio-ensayo de Ames¹⁷ regularmente obtiene resultados positivos.

¹⁶ Es la forma en que la fracción orgánica es sistematizada de acuerdo con siete subfracciones, siendo estas los ácidos, bases, alcanos, aromáticos, oxigenados transicionales e insolubles.[15]

¹⁷ La prueba de Ames es un ensayo biológico para evaluar el potencial mutagénico de compuestos químicos.

Generalmente es presentada la mutagenicidad del total de esta fracción, pero los esfuerzos se han hecho para descubrir que sub-fracción es la responsable específica; la mayoría de los estudios apuntan a los PAH y los NPAH, más al último particularmente. No se han reportado buenos temas sobre la mutagenicidad como función de las operaciones del vehículo, y tampoco como función del tamaño de partícula. Muchos compuestos no son mutagénicos, y actúan como diluyentes. Las estrategias de controles de emisión que reducen la masa de las partículas orgánicas a menudo incrementan la mutagenicidad de las partículas (por mg).

Por parte de la caracterización demográfica se toman en cuenta una vasta formación de factores extraños, como el ciclo de trabajo, la formulación del combustible y los equipos de post tratamiento (EGR, post tratamientos y FIE).

1.1.5 MP y BC con mezclas de biodiesel

De acuerdo con los estudios respecto al impacto del biodiesel en las emisiones de MP, el uso de una mezcla de biocombustible causa una reducción del MP. Esto se debe en parte a que el biodiesel tiene un contenido de azufre más bajo y que contiene oxígeno, lo que puede mejorar la combustión y reducir la formación de partículas sólidas. Sin embargo, otros estudios han encontrado que las mezclas de biodiesel pueden aumentar las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), que son precursores de contaminación atmosférica y formación de smog.

El impacto del biodiesel en la emisión de MP y BC puede variar según varios factores como la composición del biodiesel, las condiciones de operación del motor y el diseño del motor. Los puntos clave sobre cómo el biodiesel puede afectar estas emisiones son:

Contenido de azufre: El biodiesel generalmente tiene un contenido de azufre más bajo que el diésel convencional. El azufre en el combustible puede contribuir a la formación de partículas, por lo que un menor contenido de azufre en el biodiesel puede reducir las emisiones de MP.

Contenido de oxígeno: El biodiesel contiene más oxígeno en su composición que el diésel de petróleo, lo que puede mejorar la combustión y reducir la formación de partículas durante la combustión del combustible en el motor. Esta mejora en la combustión puede contribuir a una reducción en las emisiones de MP y BC.

Propiedades de combustión: El biodiesel tiene diferentes propiedades de combustión en comparación con el diésel convencional. Investigaciones sugieren que el biodiesel puede tener una mayor eficiencia de mezcla y una tasa de combustión más rápida, lo que puede influir en la formación de partículas y reducir las emisiones de MP y BC.

Composición del biodiesel: La composición exacta del biodiesel, incluidos los tipos de materias primas utilizadas y los procesos de producción, puede afectar sus efectos en las emisiones. Investigaciones han encontrado que ciertos tipos de biodiesel pueden reducir las emisiones de MP en comparación con otros, dependiendo de su composición química y propiedades de combustión.

Sin embargo, estos estudios se refieren a vehículos con tecnologías previas a la usada en este estudio (Euro 5). Los vehículos con EURO 5 están equipados con un sistema de filtro de partículas, esto quiere decir que las emisiones de MP se ven reducidas en un 90%. Tomando esto en consideración, los mismos filtros son usados en los ensayos, para capturar la mayor cantidad de MP posible. Luego de pesar los filtros en el laboratorio, la masa total de material acumulado en ellos fue menor que el límite de detección de la balanza y por tanto ninguna conclusión se pudo obtener respecto a las emisiones de MP con el uso de distintas mezclas de biodiesel. Esto comprueba que el filtro de partículas (DPF) no es solo efectivo en remover las partículas más grandes como el MP10, sino que también es efectivo en remover las partículas más pequeñas porque todos los tamaños fueron removidos por este filtro. Este descubrimiento confirma que el filtro de partículas instalado en vehículos livianos diésel modernos puede desempeñar un papel importante en la reducción de las emisiones de MP y BC cuando se utiliza biodiesel en motores diésel. Sin embargo, es crucial considerar cómo las propiedades del biodiesel y las condiciones de operación del motor pueden afectar la eficacia del DPF y, en última instancia, su capacidad para controlar las emisiones.

Con lo que respecta a los efectos en la regeneración del DPF estudios han investigado cómo el uso de biodiesel afecta la regeneración de este. En general se encuentra que el biodiesel presenta una regeneración más eficiente, además de una menor acumulación de cenizas en el filtro, lo que puede influir en su rendimiento. [23]

En cuanto a la influencia de la composición del biodiesel sabemos que, la composición exacta del biodiesel, incluidos factores como el tipo de materia prima utilizada y los procesos de producción, puede tener un impacto significativo en cómo afecta al DPF. Un estudio examinó cómo diferentes tipos de biodiesel y sus mezclas afectaban la eficacia del DPF en la reducción de partículas.

2 Metodología

Para determinar el estudio de emisiones de MP y BC generadas en un proceso de combustión en un motor de combustión interna de ciclo diésel con mezclas de biodiésel de distintos orígenes y su uso en vehículos comerciales se desarrollaron mediciones experimentales en una camioneta operando con estos combustibles. Para ello se utilizó un conjunto de procedimientos que marcaron el rumbo de la investigación. Para llevar a cabo dichos procedimientos se requieren distintas condiciones de trabajo, implementaciones, equipos de medición, capital humano y protocolos estandarizados de medición indispensables para obtener una base de datos de emisiones de MP y BC reproducibles y actualizable de acuerdo con los requerimientos de la comunidad científica para efecto de estudios o material científico, y además de ser útil para su aceptación o rechazo de los biocombustibles por parte del estado. Es importante generar y estandarizar una metodología para el de actualización de estos contaminantes de los biocombustibles tanto para los ensayados en este estudio como los futuros. Estos fomentarán la investigación y elaboración de biocombustibles a partir de aquellas materias primas que muestre mínimas emisiones contaminantes, aspecto que será importante en aquellas ciudades que presenten niveles elevados de contaminación atmosférica.

2.1 Combustibles

Uno de los objetivos principales del proyecto corresponde al uso de mezclas de biodiésel de diferentes orígenes. Para ello es necesario contar con un combustible base, que en este caso corresponde a diésel A-1, conseguido por el proyecto para las pruebas. Y ya se cuenta con cuatro biodiésels de distintos orígenes para realizar las diferentes mezclas que se usarán en el vehículo mencionado en el punto anterior.

En el D.S N°66 en el que se revisa, reformula y actualiza el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana, se estipula que: “El petróleo diésel que se distribuya o expenda en la Región Metropolitana deberá ser Grado A1 y cumplir con los siguientes requisitos:” [48]

Tabla 1. Requisitos combustible A1.

Requisitos	Unidad	Diésel A-1		Método de Ensayo ASTM
		Máximo	Mínimo	
Punto de Inflamación	°C		52	D93, D3828
Punto de Ecurrimiento	°C	-1		D97, D5950, D5949
Punto de Obstrucción de Filtro en Frío	°C	Informar		D6371
Agua y Sedimento	%V/V	0.05		D2709
Residuo carbonoso, 10%residuo				
• Según Ramsbottom	%M/M	0,21		D524
• Micrométodo	%M/M	0,20		D4530
Cenizas	%M/M	0.01		D482
Destilación	°C	350	282	D86
90%				
Viscosidad	cSt	4.1	1.9	D445
Cinemática a 40°C				
Azufre	PPM	15		D5453, D2622, D7039
Corrosión Lámina de Cobre	N°	1		D130
Número de Cetano	N°		50	D976, D613
Densidad a 15°C	Kg/lt	0.85	0.82	D4052, D1298
Aromáticos	%V/V	35		D5186
Aromáticos policíclicos	%M/M	8		D5186
Color	N°	Sin colorante		D1500
Lubricidad (60°C)	µm	460		D-6079

Para los biodiesel, el hecho de que las empresas solo vendan a una gran escala creó dificultades para la obtención de este mismo. Pero se logró gestionar la compra de 4 biodiesel de distintos orígenes, adquiriendo cuatro biocombustibles, de procedencia de grasa animal, de aceite de frituras, aceite de soya y aceite de palma.

Tanto para la Tabla 2 como para la Tabla 3, los llamados FAME 1, FAME 2, FAME 3, FAME 4, corresponden a biodiéseles de grasa animal, aceite de fritura, aceite de soya y aceite de palma respectivamente.

Tabla 2: Perfil de esteres. (valores otorgados por el fabricante)

Ester metílico	Cn:db	FAME 1			FAME 2			FAME 3			FAME4
		Med. 1 % masa	Med. 2 % masa	Media	Med. 1 % masa	Med. 2 % masa	Media	Med. 1 % masa	Med 2. % masa	Media	
Láurico	C12:0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.204
Mirístico	C14:0	1.08	1.03	1.05	0.07	0.00	0.03	0	0	0	1.06
Palmitico	C16:0	17.45	17.39	17.42	4.99	4.52	4.76	9.03	9.31	9.17	43.86
Palmitoleico	C16:1	1.57	1.56	1.56	0.11	0.08	0.09	0.08	0.10	0.09	0.124
Esteárico	C18:0	11.51	11.64	11.58	2.76	2.60	2.68	4.15	4.18	4.17	4.69
Oleico	C18:1	38.38	38.59	38.48	33.69	33.30	33.49	19.11	19.33	19.22	40.08
Linoleico	C18:2	14.99	15.05	15.02	25.36	25.21	25.29	52.28	52.98	52.63	9.19
Linolénico	C18:3	0.79	0.79	0.79	1.71	1.66	1.68	7.98	8.18	8.08	0.152
Araquídico	C20:0	0.21	0.21	0.21	0.27	0.28	0.27	0.34	0.58	0.46	0.385
Gadoleico	C20:1	0.56	0.57	0.56	0.33	0.37	0.35	0.19	0.21	0.20	0.152
Behénico	C22:0	0	0	0	0.61	0.66	0.64	0.35	0.34	0.35	0
Erúcico	C22:1	0	0	0	0.00	0.06	0.03	0	0	0	0
No identificados		3.01	2.95	2.98	0.61	1.09	0.85	1.02	1.34	1.18	0
Total		89.54	89.77	89.66	70.50	69.84	70.17	94.54	96.55	95.55	100

Además, se obtienen otras propiedades de interés medidas para los biocombustibles, estas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedades medidas. (valores otorgados por fabricante)

Poder calorífico superior (MJ/kg)	FAME 1			FAME 2			FAME 3			FAME 4
	Medida 1	Medida 2	Media	Medida 1	Medida 2	Media	Medida 1	Medida 2	Media	
	40.1427	39.9472	40.0449	38.6722	38.2215	38.4468	40.0527	39.9322	39.9924	

Densidad a 15°C (kg/m ³)	875	875	875	890	890	890	884	884	884	874.8*
Viscosidad cinemática a 40°C (cSt)	4.4395	-	4.4395	6.1722	-	6.1722	3.9599	-	3.9599	4.533*
POFF (°C)	8	-	8	-1	-	-1	-4	-	-4	
Flash Point (°C)	170.5	171.5	171	<30	<30	<30	159.5	160	159.75	

Los detalles de los cuatro biocombustibles de distintos orígenes son los siguientes:

2.1.1 Aceite de fritura

En la Tabla 2y en Tabla 3 se presentan sus propiedades respectivas, este biodiesel corresponde a FAME 2.

Este biodiesel corresponde al de origen de aceite de frituras. Este es de producción nacional de la empresa “FAME SA”, la cual produce biodiésel llamado metiléster a partir de aceites vegetales nuevos y de descarte (ex frituras). Al igual que el biodiésel anteriormente mencionado, se adquieren 400 [l] divididos en dos tambores.



Ilustración 2.1 Tambor de biodiésel de la empresa FAME.

Se toman muestras representativas de este biodiésel y de diésel base A-1, se analizan y se obtiene resultados para cada propiedad. Estas mediciones se realizan en el Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad. Todas las pruebas se realizan bajo norma ASTM para combustibles líquidos. Se obtienen valores característicos de Viscosidad [ASTM D-445], Densidad [ASTM D-1481], y Poder Calorífico Superior e Inferior [ASTM D-240]. [1][2][3][4][5]

Tabla 4. Propiedades termo físicas del combustible. [4]

	Diésel A-1	Biodiésel FAME	Unidades
Densidad a 15°C	0,835	0,894	kg/l
Viscosidad a 40°C	2,62	7,01	cSt
Poder Calorífico Superior	45712	37662	kJ/kg
Poder Calorífico Inferior	42658	35284	kJ/kg

2.1.2 Grasa animal

En la Tabla 2 y en Tabla 3 se presentan sus propiedades respectivas, este biodiesel corresponde a FAME 1.

El biodiesel fabricado a partir de aceite de grasa animal es adquirido de la empresa española “Stocks del Valle SA” una cantidad de 2 tambores de 200 [l] cada uno.



Ilustración 2.2 Contenedor biodiesel grasa animal (Fuente propia).

La siguiente tabla muestra las propiedades fisicoquímicas de este producto:

Tabla 5: Propiedades fisicoquímicas de biodiesel grasa animal.

Información general de las propiedades fisicoquímicas	
Apariencia	Aceite líquido verde/amarillo
Olor	Suave
Punto de fusión/punto de congelación	6.29°C a 1 atm

	El rango de temperatura de fusión va de -16.92°C to +15.59°C.
Punto de ebullición	354.3°C at 1 atm
Punto de inflamación	173°C +/- 1°C
Velocidad de evaporación	No disponible
Inflamabilidad (sólido, gas)	No inflamable
Presión de vapor	4.2 m Bar at 25°C
	420 Pa, at 25°C
	3.6 m Bar at 20°C
Densidad de vapor	No disponible
Densidad relativa	0.8881 g/cm ³ a 20°C
Solubilidad	< 0,023 mg/l Límite de detección instrumental
Coeficiente de partición: n-octanol/agua	Log Kow = 6.2 a 25°C
Temperatura de auto-ignición	261°C +/- 5°C
Viscosidad	6.1 mPa*s a 20°C
Propiedades de explosión	No explosivo
Propiedades oxidantes	No oxidante

2.1.3 Aceite palma

Es un biodiesel de aceite de palma, producido y donado por Stock de Vallés. En la Tabla 2 y en Tabla 3 se presentan sus propiedades respectivas, este biodiesel corresponde a FAME 4.

2.1.4 Aceite de soya

Es un biodiesel de aceite de soya, de origen argentino. En la Tabla 2 y en Tabla 3 se presentan sus propiedades respectivas, este biodiesel corresponde a FAME 3.

2.2 Equipamiento

La metodología de los ensayos se llevó a cabo bajo el método tradicional de laboratorio o “fuera de ruta” cuyo equipamiento se encuentra instalado en el Laboratorio de Energía Renovables (LER) de la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María. Este método para la medición de emisiones vehiculares recibe este nombre debido a que su aplicación se hace sobre un dinamómetro de chasis, donde el vehículo se somete a un ciclo de conducción que simularía las condiciones reales de ruta al conducir tanto urbanamente como interurbanamente. Cabe destacar que estos ciclos de conducción varían dependiendo del criterio de una conducción real que tiene el autor de este. Tiene la función de recolectar 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, para poder tener una correcta lectura de los gases emitidos por parte de los analizadores. A partir de la muestra, se obtiene en cada ensayo la concentración de los distintos contaminantes emitidos a estudiar. A continuación, se describen las condiciones de prueba que se requieren para la correcta toma de muestra del material partículas y BC, una descripción del laboratorio, el banco dinamométrico y de la camioneta a ensayar.

2.2.1 Banco dinamométrico

Para la realización de los ensayos, se cuenta con un freno dinamométrico de marca MAHA modelo FPS 2700, que consiste en un banco de pruebas para la simulación de marcha de vehículos de hasta 260 [KW] de potencia y peso máximo de 2,7 [ton]. Para llevar a cabo la simulación de marcha, dicho freno cuenta con un software que permite medir la potencia del vehículo ensayado, como también simular las condiciones en ruta, para lo cual se deben ingresar parámetros tanto del vehículo, como del propio equipo, de manera que se aplique la correcta fuerza por parte de los rodillos a la camioneta,

dentro de ellos, componentes de la fuerza de tracción como la resistencia a la rodadura, resistencia al aire, etc. Por otra parte, el software, en específico la función de simulación de marcha, permite la carga e implementación del ciclo de conducción europeo, NEDC, con el cual se han realizado todas las mediciones de trabajos de títulos previos y el presente. [5]

De esta manera, se utilizarán en su mayoría los mismos equipos utilizados en memorias previas, sin embargo, parte del procedimiento experimental junto con el procesamiento de datos se han modificado.

El ciclo de marcha está determinado como una secuencia de tiempo y velocidades cargado en el software de control del dinamómetro y el conductor lo visualiza durante el desarrollo de las pruebas en una pantalla montada sobre el parabrisas del vehículo. En la Tabla 6 se especifican las principales características de este equipo.



Ilustración 2.3 Banco de ensayo de potencia MAHA FPS 2700. [4]

El dinamómetro está instalado en un container con los rodillos a unos 50 cm de altura, por ende, posee rampas que permite ubicar el vehículo sobre los rodillos en su eje de tracción, y quedando el resto del vehículo sobre plataformas.

Tabla 6. Características banco de ensayo de potencia MAHA FPS 2700. [4]

Fabricante	MAHA GMBH & Co. KG.
Origen	Alemania
Modelo	FPS 2700
Software	FPS Versión a partir de V1.08.001 ASM H8 Versión a partir de V2.50
Peso máx. del vehículo admisible	2,7 t
Potencia máx. del vehículo normalizada	260 kW
Velocidad máxima admisible	200 km/hr
Admite vehículos con tracción 4x4	NO
Sentido de giro de los rodillos	1, sentido horario
Computador de control	Intel ® Core ™ 2 Duo CPU E4600 @ 2.40 GHz, 1 GB de RAM
Sistema operativo	Microsoft Windows XP Profesional



Ilustración 2.4 Rack que contiene computador de control del dinamómetro. (Fuente propia)

2.2.2 Túnel de dilución

Túnel de doble dilución marca AVL-Pierburg, de acero inoxidable, con sistema de muestreo gravimétrico para MP, conforme Directiva Europea 1999/96 EC.

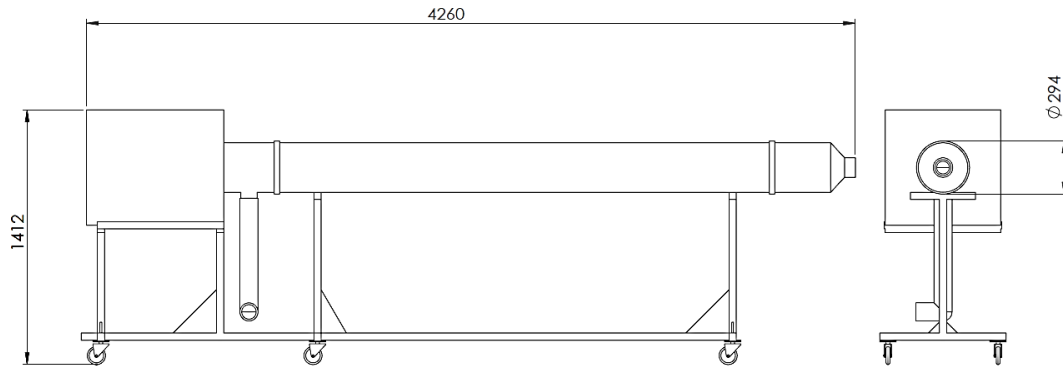


Ilustración 2.5 Dimensiones generales del túnel de dilución Pierburg. [17]

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.

Para la medición de la emisión de MP, el túnel cuenta con una sonda con cuatro tomas de muestra. Cada una de estas tomas de muestra consta con una porta filtros. Esta porta filtros puede contener hasta dos filtros en serie de 47 mm tanto de MP10 como de MP2,5. El motivo de contener dos filtros en serie es para corroborar que el filtro principal esté captando la mayoría del MP tomado por la muestra, en comparación a lo captado por el filtro secundario.

2.2.3 Vehículo

Para realizar los ensayos en el banco del freno dinamométrico señalado en la Ilustración 2.3 se utiliza un vehículo correspondiente a una camioneta Mitsubishi Katana L-200 CRM de motor diésel. Este vehículo es del año 2014 por lo que está regido bajo la norma de emisiones Euro V. La camioneta se monta al dinamómetro de chasis mediante un sistema de rampas metálicas dejando las ruedas traseras sobre los rodillos característicos. Si bien la camioneta posee tracción 4x4 señalado dentro de sus especificaciones, ésta tiene la opción de cambiarse a tracción trasera y así poder realizar las pruebas en los rodillos. Para observar en detalle la información técnica y mecánica de la camioneta se presenta el Anexo A – Especificaciones técnicas..

Si bien la camioneta tiene tracción 4x4, esta tiene la opción de cambiarse a tracción trasera y realizar las pruebas en los rodillos. A modo de seguridad, la camioneta se asegura con dos cadenas en la parte posterior y cuñas metálicas en las ruedas delanteras que van fuera del dinamómetro. De esta forma se corren los ciclos de conducción de forma segura para el conductor y las personas que operan el laboratorio.

Es importante mencionar que este vehículo tiene un sistema de control de emisiones, lo que reduce las emisiones de CO, HC y NOx.

Tabla 7. Sistema de control emisiones de camioneta Katana L-200. Fuente [20].

Sistema	Descripción	Propósito
Sistema de control de emisiones del cárter del cigüeñal	Sistema utilizado para prevenir que la mezcla de escape generada en el interior del cárter del cigüeñal entre en la atmósfera	Reducción de HC

Sistema de control de emisiones evaporativas	Evita que los vapores del combustible generados en el tanque de combustible escapen a la atmósfera	Reducción de HC
Sistema de recirculación de los gases de escape (EGR)	Una parte de los gases de emisión circula de la lumbrera de escape de la culata de cilindros a la cámara de combustión a través del múltiple de admisión.	Reducción de NOx
Convertidor catalítico de oxidación	Convertidor catalítico de dos vías, oxida los monóxidos de carbono (CO) y los hidrocarburos	Reduce CO, HC, NOx.

2.3 Instrumentos de medición de MP y BC

En esta sección, se describen los principios de funcionamiento de los equipos que miden MP emitidos por vehículos livianos.

Previo al análisis de MP de vehículos diésel en la aplicación del método en laboratorio, es necesario diluir los gases provenientes del tubo de escape de un vehículo en operación normal y mezclarlos con aire. Ésta mezcla se realiza en un dispositivo denominado túnel de dilución descrito en 2.2.2.

Sistema de dilución: El túnel de dilución consiste en un cilindro cuyo largo es al menos 10 veces su diámetro. Los gases de escape emitidos por el vehículo de ensayo se diluyen con el aire ambiente en una relación media de 1:5 a 1:10 y se aspiran, mediante un ordenamiento especial de bombas, de tal manera que el flujo volumétrico total de los gases de escape y el aire diluyente sea constante. La adición de aire diluyente

depende, entonces, del volumen momentáneo de los gases de escape. Del caudal diluido de gases de escape se toma continuamente una muestra representativa, que se almacena en una o varias bolsas (gases de escape).

La función del túnel es homogenizar el flujo de aire con los gases de escape, donde disminuye la temperatura (no superior a 52 [°C]) y la concentración de los gases bajo condiciones de flujo constante. Deben emplearse relaciones de corrientes turbulentas (número de Reynolds ≥ 4000), para que los gases de escape diluidos sean homogéneos en los puntos de toma de muestras y para que la toma de muestras de gases y de partículas sea representativa [7].

A continuación, se describen los equipos utilizados para la medición de MP y BC, además de las condiciones de prueba que se requieren para la correcta toma de muestra del material partículas y BC.

2.3.1 Método gravimétrico

Este método consiste en obtener una muestra de los gases diluidos, la cual es conducida a través de filtros que acumulan el MP. Dichos filtros son pesados en una cámara de pesaje acondicionada, previa estabilización, en condiciones de humedad y temperatura controladas. La masa de MP es determinada por diferencia del peso del filtro con MP, menos el peso del filtro medido antes del ensayo.



Ilustración 2.6 Filtros de MP10

Además, se cuenta con un sistema de filtros que corresponden a los cuatro porta-filtros donde se mide el MP, permitiendo medir cuatro fases distintas de un ciclo. Pero comúnmente los ciclos de conducción poseen de dos a tres fases distintas por lo que el cuarto filtro se puede usar para medir el background del laboratorio. Estos porta-filtros utilizan dos filtros, uno primario y otro secundario, situación que permite medir su eficiencia y de acuerdo con eso determinar si se utilizan ambos filtros para su pesaje o solamente uno. Este cálculo se realiza por gravimetría, es decir, dichos filtros son pesados inicialmente en una cámara de pesaje acondicionada, previa estabilización, en condiciones de humedad y temperatura controlada. Luego de realizado el ciclo de conducción se vuelven a estabilizar los filtros y se pesan, calculando la masa de MP de acuerdo con la diferencia que existe entre el peso del filtro con MP y el peso del filtro medido antes del ensayo. Cabe destacar que este valor de masa de MP solo corresponde a una muestra, por lo que posteriormente se debe corregir con el volumen total medido por el equipo CVS. Otro dato importante para mencionar es que el mayor error que se produce en las mediciones de MP para vehículos diésel es en la manipulación del filtro, el error por dicho factor oscila entre un 4-5 %.

Los cuatro porta-filtros van conectados directamente a la bomba del equipo PS 2000 B mediante un sistema de mangueras a la salida, además esta tiene un sensor de

temperatura PT100¹⁸. Se debe controlar que esta temperatura no supere los 52 [°C], de no ser así se registrará un error en el sistema de control.



Ilustración 2.7 Los porta-filtros en la figura izquierda y el porta-filtro abierto junto con la manipulación de este en la foto derecha.

Pero para el efecto de esta investigación se estimó necesario extraerle el filtro DPF a la camioneta con norma euro V, por lo que sus emisiones aumentan, y la metodología de muestreo varía para el análisis de MP por el método gravimétrico siendo el siguiente:

Para los ensayos en frío se utiliza un filtro para el primer ciclo urbano, luego se cambia a otro filtro para los tres ciclos urbanos restantes, y al empezar el ciclo extraurbano se utiliza un filtro distinto también.

¹⁸ Sensor de resistencia de platino con una resistencia nominal de 100 ohmios a 0 °C, utilizado para medir con precisión la temperatura en una amplia gama de aplicaciones industriales y científicas.

Para el caso de los ensayos en caliente se utiliza un filtro para los cuatro ciclos urbanos y otro distinto para el ciclo extraurbano.

Todo esto al margen de que para tanto el ciclo urbano como extraurbano se ocupan revoluciones de la bomba de extracción del equipo Pierburg distintas, siendo de 1000 y 1400 rpm respectivamente.

2.3.2 Espectrómetro laser de aerosol

El espectrómetro laser de aerosol se clasifica como un contador de partículas óptico, instrumentos de medición de partículas individuales que clasifican y cuentan el número y tamaño de las partículas dependiendo de la intensidad de la luz dispersada por ellas. Proporciona una alta sensibilidad y precisión.

El espectrómetro de aerosol subyace en el principio de dispersión de la luz. Según el tamaño de una partícula que pasa, la luz se dispersa lo que se mide con el fotodetector situado en 90°. El cambio de luz captada en el detector de la foto es una medida del tamaño de las partículas y es objeto de análisis multicanal [22].

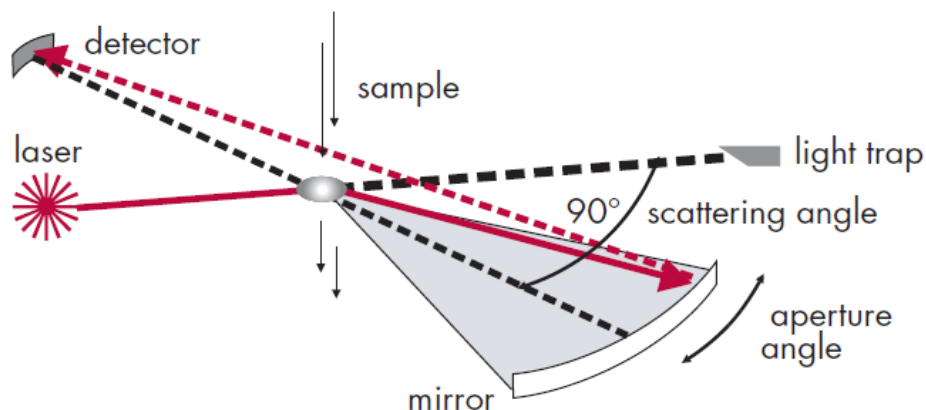


Ilustración 2.8 Principio de funcionamiento del espectrómetro laser de aerosol. [14]

2.3.3 Aetalometro

El AethalometroTM (del griego *αεφαλον*: oscurecer con hollín) es un instrumento para la medición en tiempo real de BC. El instrumento aspira aire a través de un puerto de entrada a un flujo de unos pocos litros por minuto por medio de una bomba interna. El flujo es monitoreado por medio de un medidor de flujo másico interno y se estabiliza electrónicamente. La muestra se recolecta en una cinta de fibras de cuarzo y se le hace un análisis óptico continuo mientras la muestra se recolecta. Durante este proceso la cinta no avanza, ésta solo avanza cuando el punto de muestreo alcanza la saturación.

En particular se utilizó el microAeth, un instrumento autónomo, de tamaño pequeño con un flujo de control, con almacenamiento de datos y batería que realiza su análisis de datos al juntar partículas en su filtro y utilizar la técnica de absorción óptica del aetalometro para determinar la concentración de BC en tiempo real. Los datos pueden ser descargados en un computador o subidos a un servidor para su procesamiento y visualización.



Ilustración 2.9 MicroAeth.

2.4 Procedimiento experimental y protocolos

2.4.1 Metodología de análisis para emisión de MP

La emisión de partículas Mp [g/seg] se calcula con la siguiente ecuación,

$$Mp = \frac{m_{mix} \times Pe \times M_{an}}{m_{exh}} = \frac{[m_{air} + m_{exh}] \times Pe \times M_{an}}{m_{exh} \times 10^9}$$

O, en el caso de querer saber el factor de dilución se utiliza la siguiente relación:

$$FD = \frac{m_{mix}}{m_{exh}} = \frac{[m_{air} + m_{exh}]}{m_{exh}}$$

En donde:

Mp : Emisión de partículas en [g/seg].

m_{mix} : Volumen de los gases de escape diluidos con el volumen de aire ambiente en condiciones normales.

m_{exh} : Volumen de los gases de escape.

m_{air} : Volumen aire externo.

Pe : Flujo de salida del escape $[\frac{m^3}{seg}]$.

M_{an} : Medición del analizador Grimm. $[\frac{ng}{m^3}]$

FD : Factor de dilución. Adimensional.

Para el caso del vehículo utilizado en los ensayos y memorias anteriores a este estudio, utilizan camioneta bajo la norma euro V por lo tanto sus emisiones de gases y particulado eran muy bajas por lo que se utilizaba una sola muestra de particulado para todo el ensayo, de esta forma se podrían obtener mediciones más significativas y se pueden diferenciar los resultados para cada tipo de combustible.

Con ayuda de estas expresiones extraídas de la directiva 70/220/CEE¹⁹ se procesan los datos que se adquieren desde los analizadores de emisiones, y se obtienen los datos de factores de emisión para cada uno de los contaminantes estudiados en este trabajo.

Estos datos, que para el equipo Grimm entrega información cada 6 segundos, permiten generar gráficos para estudiar su comportamiento en el transiente, luego se generan sus respectivas graficas integradas, esto para determinar la emisión total durante el ciclo y luego poder determinar la emisión por cada km recorrido durante el ciclo, en la Ilustración 2.10 se puede observar un gráfico característico de la emisión en el

¹⁹ Es una ley de la Unión Europea que establece límites máximos de emisión de contaminantes para vehículos de motor nuevos, con el objetivo de reducir la contaminación del aire y proteger la salud pública en la Unión Europea.

transiente, además, en la Ilustración 2.11 se observa su acumulado o integrado en el transiente.

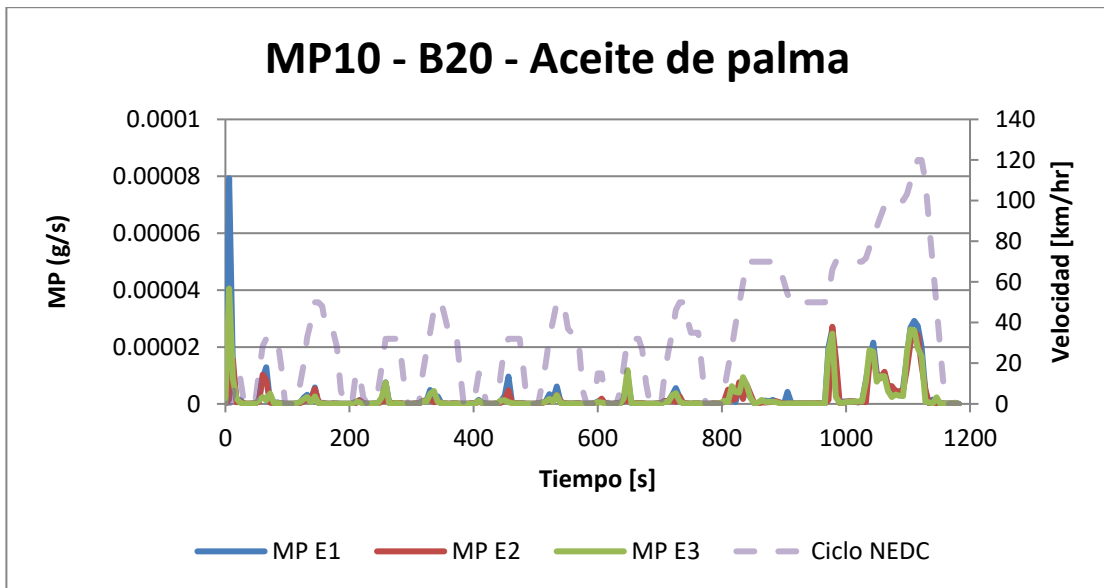


Ilustración 2.10 Grafico en transiente para MP. Fuente propia.

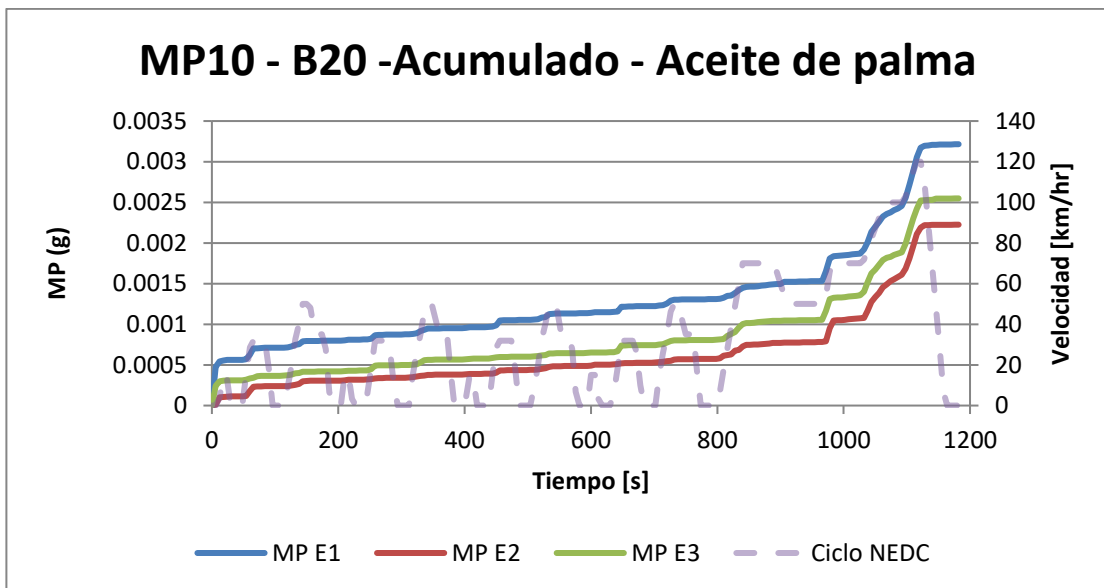


Ilustración 2.11 Grafico acumulado o integrado para MP. (Fuente propia)

Metodología para emisión en transiente

2.4.2 Metodología de análisis para emisión de BC

La emisión de partículas BC [g/seg] se calcula con la siguiente ecuación,

$$Bc = \frac{m_{mix} \times Pe \times M_{aet}}{m_{exh}} = \frac{[m_{air} + m_{exh}] \times P_e \times M_{aet}}{m_{exh} \times 10^9}$$

O, en el caso de querer saber el factor de dilución se utiliza la siguiente relación:

$$FD = \frac{m_{mix}}{m_{exh}} = \frac{[m_{air} + m_{exh}]}{m_{exh}}$$

En donde:

B_c : Emisión de partículas de BC en [g/seg].

m_{mix} : Volumen de los gases de escape diluidos con el volumen de aire ambiente en condiciones normales.

m_{exh} : Volumen de los gases de escape.

m_{air} : Volumen aire externo.

P_e : Flujo de salida del escape $[\frac{m^3}{seg}]$.

M_{aet} : Medición del analizador microAetalometro. $[\frac{ng}{m^3}]$

FD : Factor de dilución. Adimensional.

Estos datos, que para el equipo microAetalometro entrega información cada 10 segundos, permiten generar gráficos para estudiar su comportamiento en el transiente, luego se generan sus respectivas graficas integradas, esto para determinar la emisión total durante el ciclo y luego poder determinar la emisión por cada km recorrido durante el ciclo, en la Ilustración 2.12 se puede observar un gráfico característico de la emisión en el transiente, además, en la Ilustración 2.13se observa su acumulado o integrado en el transiente.

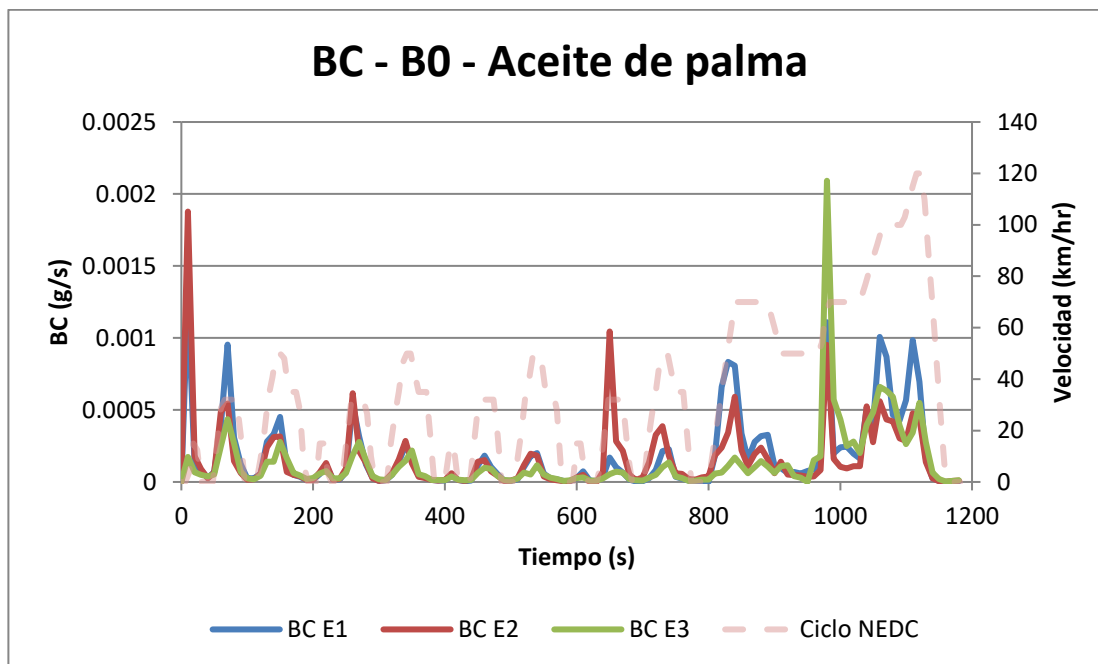


Ilustración 2.12 Grafico en transiente para BC. (Fuente propia).

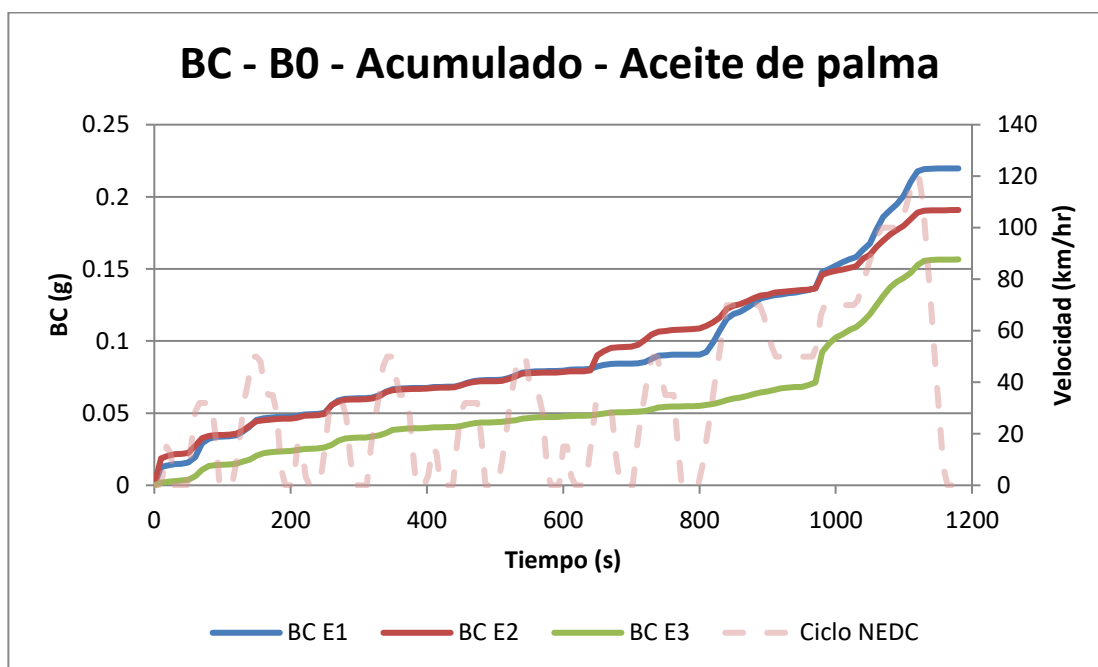


Ilustración 2.13 Grafico acumulado o integrado para BC. (Fuente propia)

3 Resultados

En el presente capítulo, se presentan los resultados de emisión de MP y de BC bajo las distintas metodologías empleadas, emisiones obtenidas y su comportamiento a lo largo del ciclo de conducción, información que se desarrolla en cada sub capítulo y presenta finalmente en un consolidado de datos a modo de resumen. Lo anterior, para los 4 tipos de biocombustibles ensayados en sus distintas mezclas.

Los resultados obtenidos son presentados detallando la metodología empleada para el caso del combustible de grasa animal en las mezclas B0 y B80, presentando los resultados para los otros combustibles en sus distintas mezclas de forma homóloga, trabajo que se desarrolla y presenta en la sección de Anexos.

3.1 Material Particulado

En el presente subcapítulo se presentan resultados, tablas y gráficos de emisiones de MP obtenido por medio de las dos metodologías mencionadas anteriormente en la sección 2.3.1 y 2.4.1, por gravimetría y por medio de tratamiento de datos del analizador Grimm. Dichos parámetros son analizados y comparados para los distintos tipos de mezclas de los combustibles utilizados y finalmente presentados de forma resumida al final del capítulo.

3.1.1 Análisis transiente

Antes de obtener los resultados de MP emitidos durante el ciclo de conducción se obtienen los resultados de las gráficas para cada mezcla comparadas en un gráfico para observar la repetitividad del ensayo, como se muestra en la Ilustración 3.1, luego de

esto se obtiene un gráfico promedio de los tres ensayos que se hacen por mezcla, Ilustración 3.2.

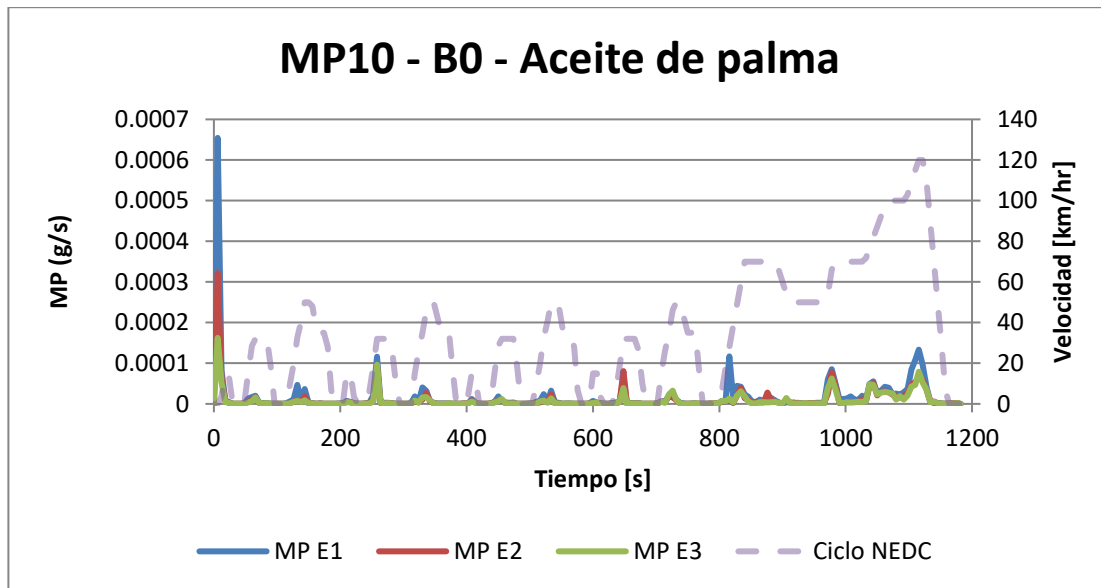


Ilustración 3.1 Grafico MP10 – B0 – Aceite de palma, repetitividad ensayos. (Fuente propia)

Para el grafico de repetitividad expuesto en la Ilustración 3.1 vemos que hay diferencias en las emisiones de MP en diversos puntos del ciclo de conducción, haciéndose notorias en la segunda fase de cada ciclo de conducción urbano, para el inicio del extraurbano, para el segundo aumento de velocidad y para el peak del ciclo de conducción extraurbano, pero existe una desviación considerable en el inicio del ciclo de conducción esto se puede deber a que las condiciones del motor van cambiando y a medida que vamos haciendo los ensayos vamos alcanzando la temperatura de trabajo del mismo.

Posterior a esto se obtiene un promedio de los tres resultados previos, esto se refleja en la Ilustración 3.2.

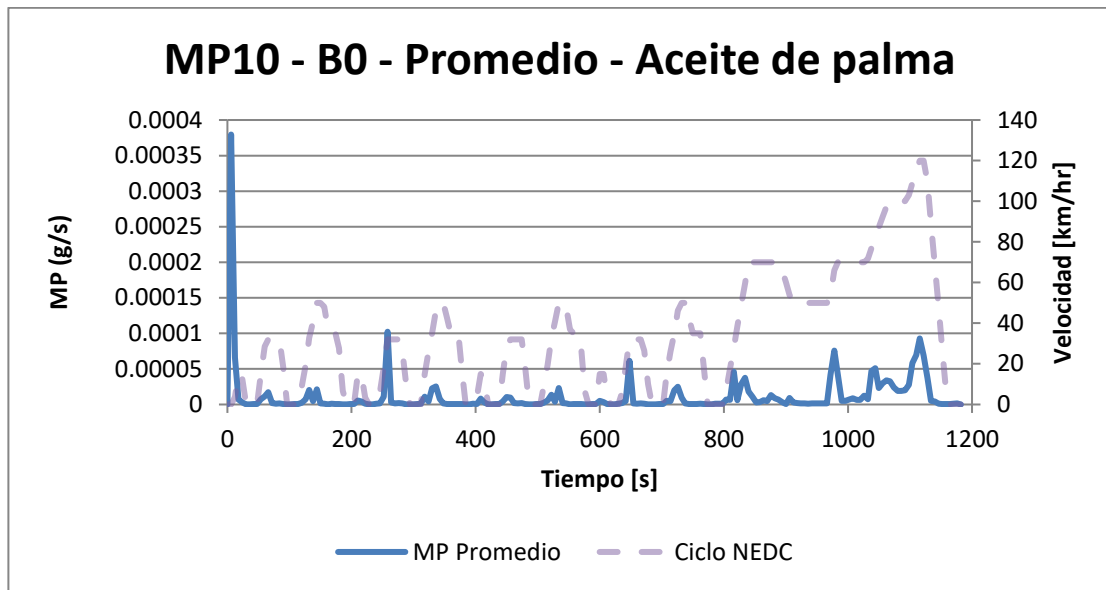


Ilustración 3.2 Grafico promedio MP10 – B0 – Aceite de palma. (Fuente propia)

Una vez teniendo esto se genera otro grafico que refleja el MP acumulado en el tiempo, siguiendo la metodología explicada en 2.4.1, esto se hace para cada repetición de la mezcla, para observar su repetitividad y apreciar en que zonas hay un aumento más marcado de las emisiones, en la Ilustración 3.3 se observa lo anteriormente mencionado, por último se expone el grafico promediado de las emisiones acumuladas en el tiempo, Ilustración 3.4.

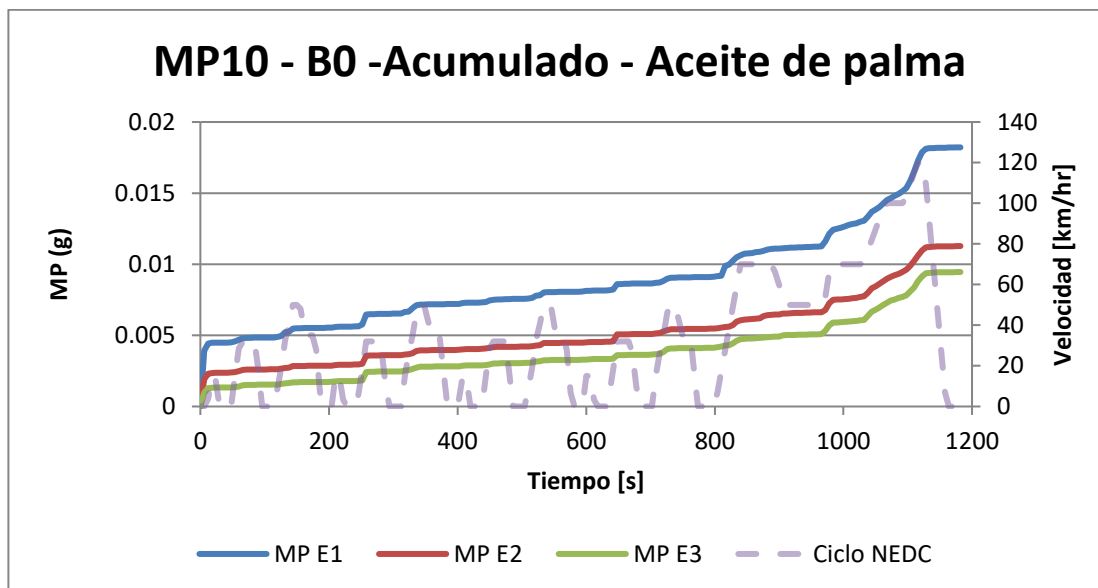


Ilustración 3.3 Gráfico emisión acumulada MP10 – B0 – Aceite de palma, repetitividad ensayos. (Fuente propia)

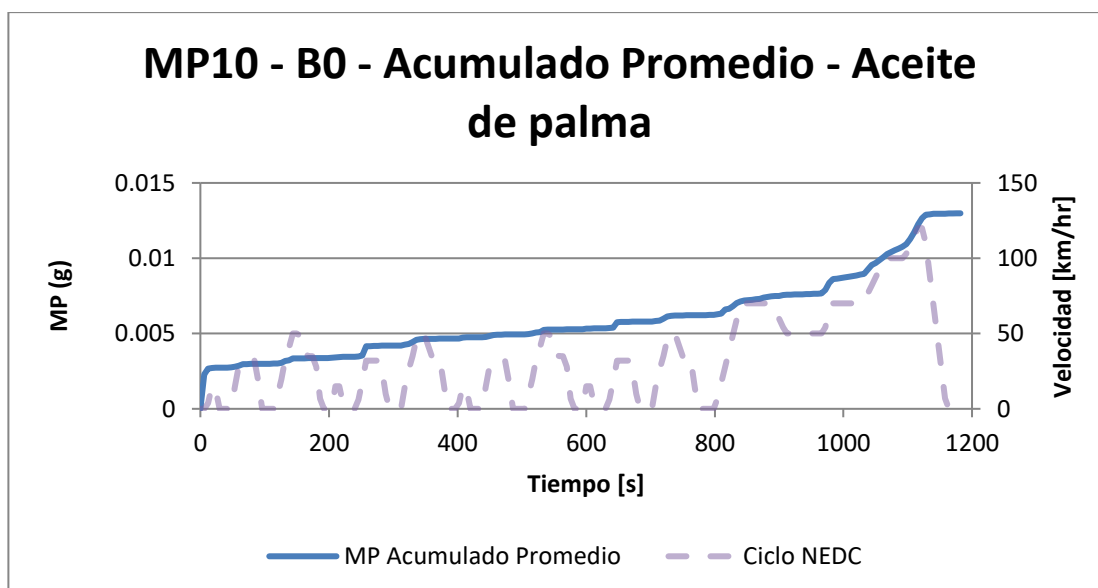


Ilustración 3.4 Gráfico promedio acumulado MP10 – B0 – Aceite de palma. (Fuente propia)

Analizando el grafico de emisiones acumuladas en el tiempo, las cuales son de gran interés para observar los comportamientos de las emisiones en métodos experimentales, tenemos en la Ilustración 3.4 un claro aumento en las emisiones al principio del ciclo de conducción, pueden existir desfases en el inicio que se ajustan para coincidir las partidas, además de tener un desfase en lo que se demora en partir y comenzar a emitir MP, esta demora es casi imperceptible y tiene poca variabilidad entre ensayo y ensayo, no así la cantidad de MP emitido, como se menciona en el análisis del grafico de emisión transiente.

En las ilustraciones se ejemplificó con MP10, pero existe un gráfico para cada granulometría captada por el analizador (MP10, MP2.5 y MP1) en la sección de anexos, en 6.2 Anexo B se adjuntan todos los gráficos correspondientes a lo mencionado anteriormente (transiente, promedio transiente, acumulado, promedio acumulado) para su granulometría específica.

También se realizó una comparación granulométrica entre el promedio de las emisiones en transiente con ensayos en caliente en contra de los ensayos en frío, para analizar su variación, en la Ilustración 3.5 se observa un aumento de las emisiones en todas sus granulometrías, siendo atribuido a las variaciones típicas de una partida en frio reflejado al inicio del ciclo.

En el 6.3 Anexo C se adjunta las comparaciones granulométricas entre el promedio de las emisiones de MP entre ensayos en caliente y los ensayos en frio en transiente para todas las mezclas y para los 4 biocarburantes.

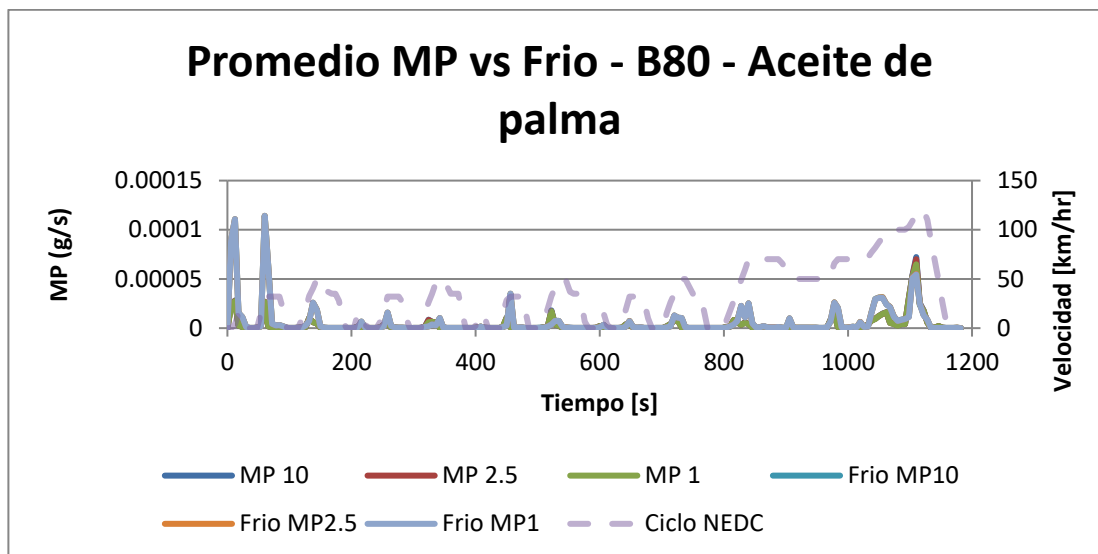


Ilustración 3.5 Gráfico por granulometría de promedio vs frio. (Fuente propia)

Resumen análisis transiente

A continuación, se presentan los gráficos resumen de las emisiones en transiente acumuladas durante el ciclo para todas las mezclas siguiendo la metodología descrita en la sección 2.4.1, junto con la granulometría específica de cada mezcla, se entrega un gráfico para cada biocombustible:

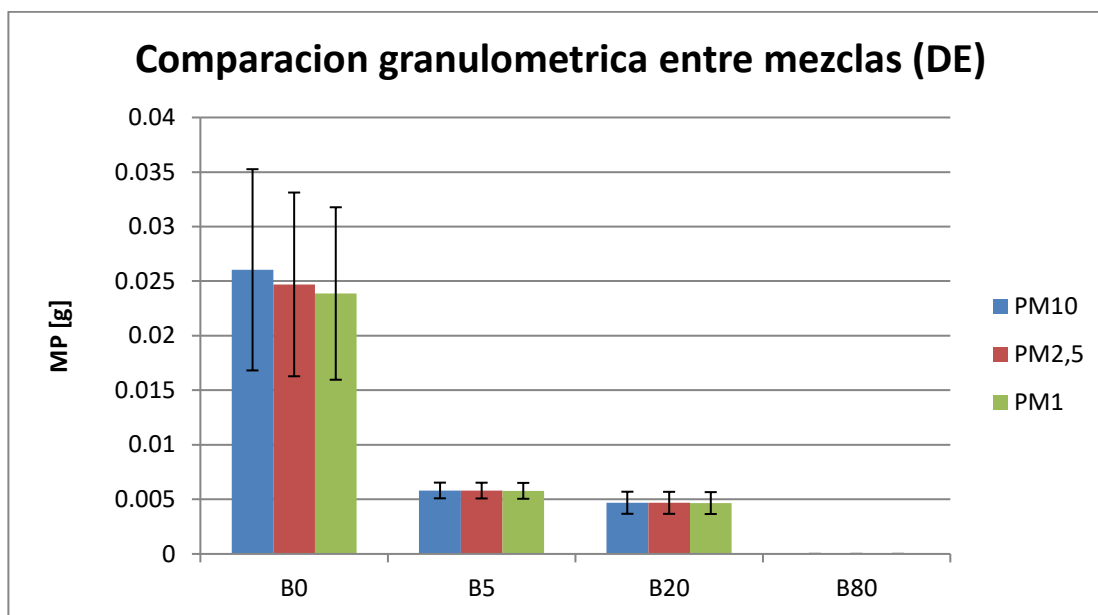


Ilustración 3.6 Comparación entre mezclas, aceite de fritura. (Fuente propia)

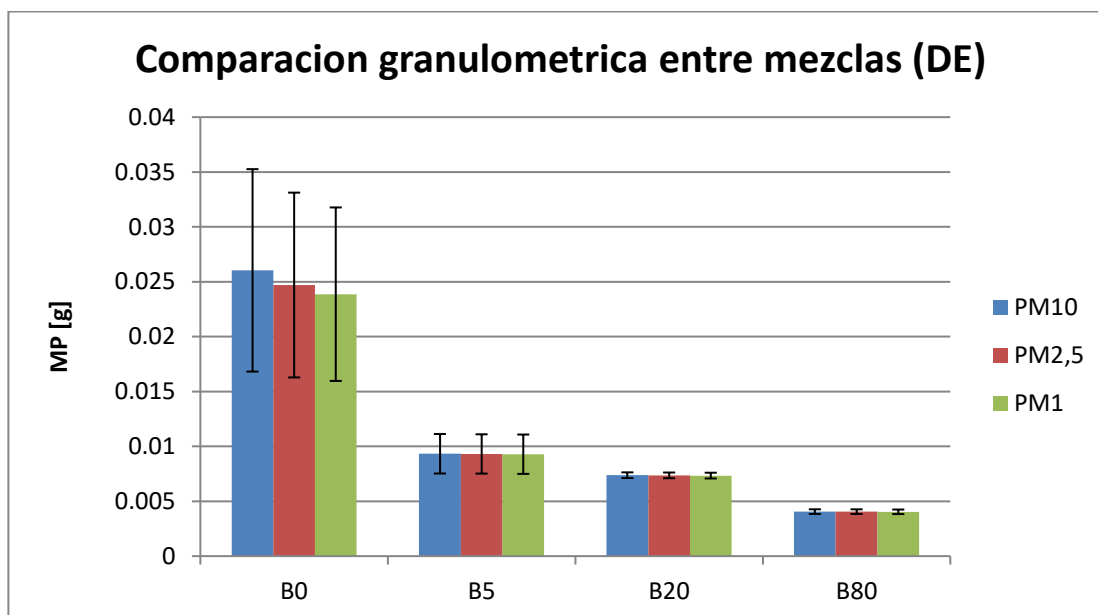


Ilustración 3.7 Comparación entre mezclas, grasa animal. (Fuente propia)

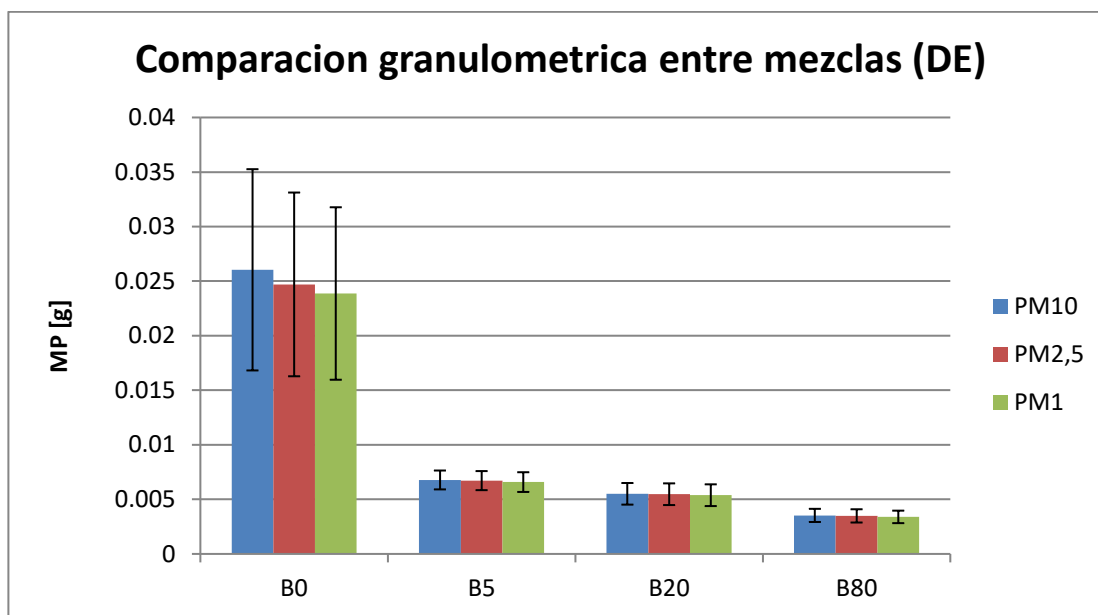


Ilustración 3.8 Comparación entre mezclas, aceite de palma. (Fuente propia)

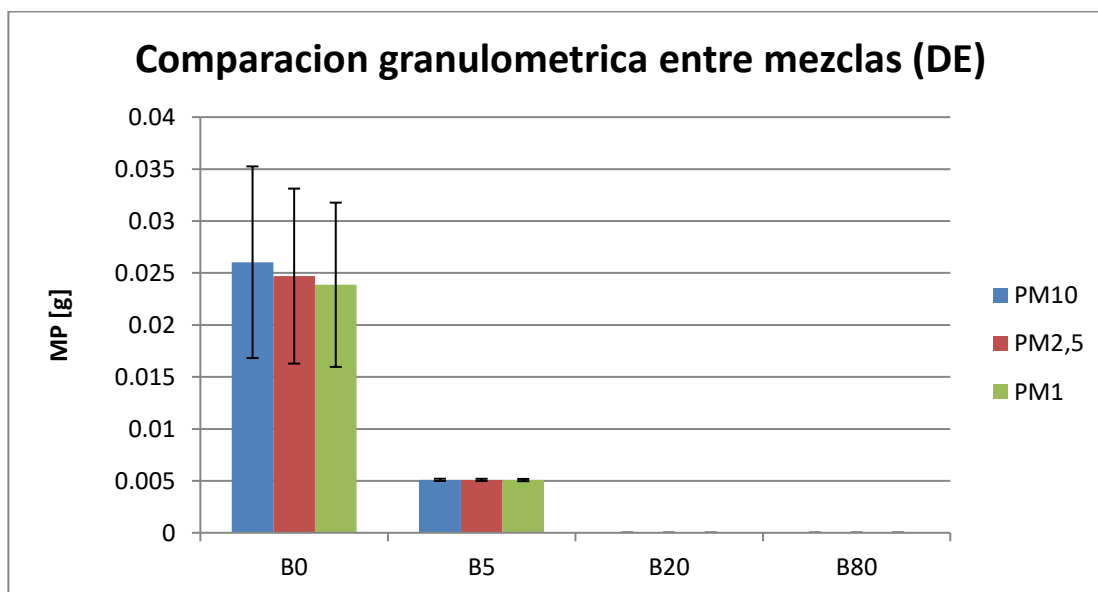


Ilustración 3.9 Comparación entre mezclas, aceite de soya. (Fuente propia)

Cualitativamente de las Ilustración 3.6, Ilustración 3.7, Ilustración 3.8 e Ilustración 3.9 se desprende lo siguiente:

- Tendencias de las emisiones con la proporción de biocombustible:

Se observa que, en general, las emisiones de MP tienden a disminuir a medida que aumenta la proporción de biocombustible en la mezcla. Esta tendencia es evidente en biocombustibles como el de fritura, aceite de palma y grasa animal, donde se registran reducciones consistentes en las emisiones de MP10, MP2.5 y MP1 a medida que aumenta la proporción de biocombustible. Sin embargo, para el biocombustible de aceite de soya, al tener solo datos de la mezcla B5 no es posible establecer una relación entre la proporción de biocombustible y las emisiones de MP.

- Comparación entre biocombustibles:

En términos generales, el biocombustible de fritura parece ser el más efectivo en la reducción de las emisiones de MP en todas las proporciones de mezcla, seguido por el de aceite de palma y grasa animal. El biocombustible de aceite de soya presenta la mayor disminución de MP para todos los tipos de emisiones de todos los biocombustibles si limitamos el análisis solo a la mezcla de B5.

- Impacto en diferentes tamaños de partículas:

La efectividad de los biocombustibles en la reducción de emisiones de MP puede variar según el tamaño de partícula. Algunos biocombustibles pueden mostrar una mayor reducción en MP10 en comparación con MP2.5 y MP1, mientras que otros pueden tener efectos similares en todos los tamaños de partículas.

Ahora, cuantitativamente tenemos lo siguiente:

- Análisis numérico de emisiones e identificación de mejoras significativas

Basado en los promedios de emisiones de MP para cada biocombustible y proporción de mezcla, se puede calcular la reducción promedio de las emisiones de MP para cada biocombustible en comparación con el diésel puro (B0) en diferentes proporciones de mezcla. Esto permitirá identificar qué mezclas muestran las mayores mejoras en términos de emisiones de MP. A continuación, se presentan una serie de tablas que muestran lo mencionado para los 4 biocombustibles:

Tabla 8. Resumen emisiones MP Fritura.

Acumulado final MP Fritura (g)				
Mezclas	PM10	PM2.5	PM1	DE ø
B0	0.026039	0.024702	0.023868	0.001095
B5	0.005815	0.005805	0.005783	1.66E-05
B20	0.00469	0.004683	0.004662	1.48E-05
B80	0	0	0	
B0-B5	-78%	-76%	-76%	
B0-B20	-82%	-81%	-80%	
B0-B80				

Tabla 9. Resumen emisiones MP Grasa animal.

Acumulado final MP Grasa animal (g)				
Mezclas	PM10	PM2.5	PM1	DE ø
B0	0.026039	0.024702	0.023868	0.001095
B5	0.009327	0.00931	0.009288	1.98E-05
B20	0.007373	0.007358	0.007337	1.79E-05
B80	0.004054	0.004052	0.00404	
B0-B5	-64%	-62%	-61%	
B0-B20	-72%	-70%	-69%	
B0-B80	-84%	-84%	-83%	

Tabla 10. Resumen emisiones MP Palma.

Acumulado final MP Palma (g)				
Mezclas	PM10	PM2.5	PM1	DE ø
B0	0.026039	0.024702	0.023868	0.001095
B5	0.006779	0.006719	0.006583	0.000101
B20	0.00551	0.005473	0.005382	6.56E-05
B80	0.003529	0.003487	0.003395	
B0-B5	-74%	-73%	-72%	
B0-B20	-79%	-78%	-77%	
B0-B80	-86%	-86%	-86%	

Tabla 11. Resumen emisiones MP Soya.

Acumulado final MP Soya (g)				
Mezclas	PM10	PM2.5	PM1	DE ø
B0	0.026039	0.024702	0.023868	0.001095
B5	0.005094	0.005088	0.005076	9.18E-06
B20	0	0	0	
B80	0	0	0	
B0-B5	-80%	-79%	-79%	
B0-B20				
B0-B80				

Como puede verificarse en las tablas resumen la mayor disminución en MP particulado varía según en que mezcla nos encontremos y con que granulometría, siendo esta ultima un parámetro menos influyente desde el punto de vista de una disminución de MP de una mezcla con el diésel puro B0, con una máxima disminución porcentual, de 3 puntos porcentuales para el caso de la comparación en B0-B5 entre la granulometría de MP10 y MP1, también podemos ver una mínima disminución porcentual entre granulometrías en la comparación B0-B80 para aceite de Palma, siendo esta de 0 puntos porcentuales.

Ahora si nos centramos en la disminución porcentual entre mezclas tomando como base al diésel o B0, tendríamos que la mayor disminución porcentual está dada por la comparación entre B0 y B80 para la mezcla de Palma, pero teniendo en consideración que solo se estaría equiparando con la mezcla de Grasa animal.

En la comparativa B0-B20 sin embargo vemos que la mayor disminución porcentual está dada por Fritura (82 %), luego Palma (79 %) y finalmente Grasa animal (72%), siendo la granulometría de MP10 donde se observa las mayores variaciones. Soya al no tener ensayos en esta mezcla se queda fuera del análisis.

Por último, en la comparativa B0-B5 es donde puede haber un análisis transversal ya que se poseen ensayos para los 4 biocombustibles, en este caso la mayor disminución porcentual estaría dado por Soya (80 %), Fritura (78 %), Palma (74 %) y Grasa animal (64 %), con una granulometría de MP10 para todos.

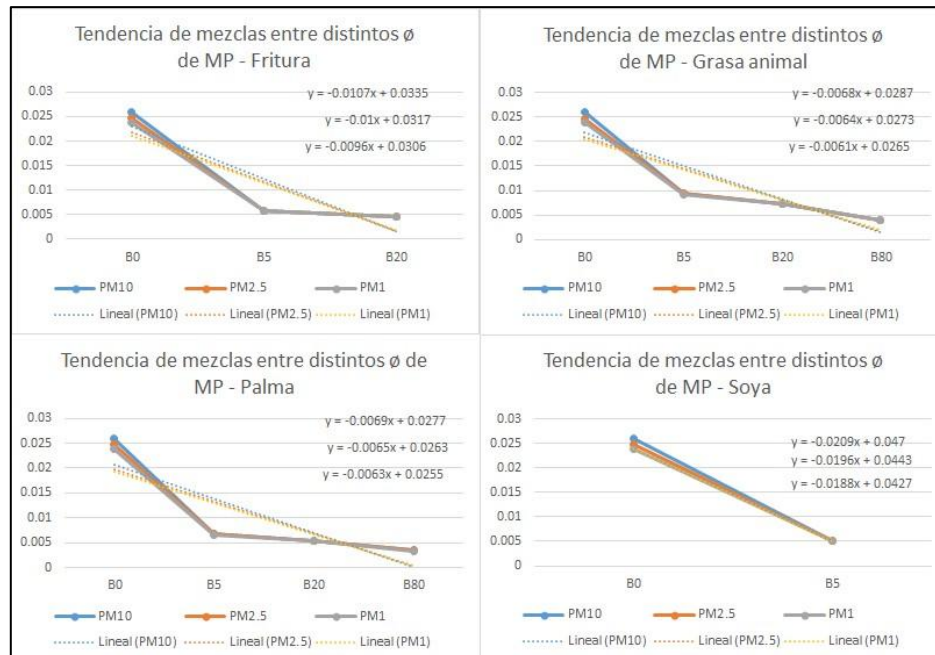


Ilustración 3.10. Tendencias de mezclas MP.

Se incorpora, además, en la Ilustración 3.10 las tendencias de las tablas del análisis numérico de las emisiones de MP. De esto se desprende una ecuación similar entre tamaño de partículas, y un coeficiente de correlación promedio de 0.77 para los tres primeros biocombustibles.

- Evaluación de efectos nulos:

Se pueden identificar las proporciones de mezcla o biocombustibles que muestran una reducción mínima o nula en las emisiones de MP y examinar más a fondo las razones detrás de estos resultados para determinar posibles preocupaciones o limitaciones en su uso.

Si bien podemos ver que para cada adición de biocombustible existe una variación en la emisión total, puede resultar notorio el caso mencionado previamente en el cual no hay una variación para una misma mezcla, pero cambiando su gravimetría, siempre desde la comparativa de comparaciones con la base de diésel o B0, teniendo el caso más evidente el de B0-B80 en Palma, en que vemos que no hay una variación porcentual entre distintas gravimetrías. Pudiendo ver que no hay una alteración significativa en la emisión de MP1 y MP2.5 con respecto a MP10.

Factores de emisión

En esta sección se ponen a disposición las tablas con los consumos de combustible, los valores de poder calorífico y la energía por masa de combustible separados por tipo de biocombustible. Estas a su vez, en conjunto con el resultado de las emisiones de MP, alimentan a las tablas de “Factor de emisión por unidad de masa” y “Factor de emisión por unidad de energía”.

Aceite de fritura

Tabla 12. Consumo combustible Fritura.

Consumo combustible FAME Fritura [g]							
Balanza	Ensayo						
Mezcla	Frio	E1	E2	E3	Promedios calientes	DE	IC 95%
B0	1222.7	971.8	955.3	953.8	960.3	10.0	11.3
B5	1171.3	986.1	971.9	951.0	969.7	17.7	20.0
B20	1179.2	986.6	957.1	955.0	966.2	17.7	20.0

Tabla 13. Poder calorífico aceite de Fritura.

Poder calorífico diésel	Poder calorífico Aceite de Fritura
[KJ/Kg combustible]	
42658	38446

Tabla 14. Energía masa combustible Fritura.

Mezcla	%	Poder calorífico inferior [kJ/Kg combustible]	Energía masa combustible (Emc) [KWh/Kg combustible]
B0	0%	42658.0	11.85
B5	5%	42447.4	11.79
B20	20%	41815.6	11.62
B80	80%	39288.4	10.91

Tabla 15. Factor de emisión por unidad de masa MP Fritura.

Factor de emisión por unidad de masa (FEum) [Kg MP/Kg combustible]												
	E1			E2			E3			Promedio		
	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1
MP B0	3.75E-05	3.52E-05	3.37E-05	2.38E-05	2.28E-05	2.22E-05	1.98E-05	1.90E-05	1.85E-05	2.71E-05	2.57E-05	2.49E-05
MP B5	6.59E-06	6.59E-06	6.57E-06	6.04E-06	6.04E-06	6.01E-06	5.33E-06	5.32E-06	5.29E-06	6.00E-06	5.99E-06	5.96E-06
MP B20	5.93E-06	5.92E-06	5.90E-06	4.20E-06	4.19E-06	4.17E-06	4.40E-06	4.39E-06	4.37E-06	4.85E-06	4.85E-06	4.82E-06
MP B80												

Tabla 16. Factor de emisión por unidad de energía MP Fritura.

Factor de emisión por unidad de energía (FEum) [Kg MP/KWh]												
	E1			E2			E3			Promedio		
	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1
MP B0	3.17E-06	2.97E-06	2.85E-06	2.01E-06	1.93E-06	1.87E-06	1.67E-06	1.60E-06	1.56E-06	2.29E-06	2.17E-06	2.10E-06
MP B5	5.59E-07	5.59E-07	5.57E-07	5.13E-07	5.12E-07	5.10E-07	4.52E-07	4.51E-07	4.48E-07	5.09E-07	5.08E-07	5.06E-07
MP B20	5.11E-07	5.10E-07	5.08E-07	3.61E-07	3.61E-07	3.59E-07	3.79E-07	3.78E-07	3.76E-07	4.18E-07	4.17E-07	4.15E-07
MP B80												

Grasa animal

Tabla 17. Consumo combustible Grasa animal.

	Consumo combustible Grasa animal [g]						
Balanza	Ensayo						
Mezcla	Frio	E1	E2	E3	Promedios calientes	DE	IC 95%
B0	1222.70	971.80	955.30	953.80	960.30	9.99	11.30
B5	1144.40	1023.40	989.70	1001.10	1004.73	17.14	19.40
B20	1225.90	1028.30	993.40	966.70	996.13	30.89	34.96
B80	1327.60	1010.00	1173.50	1046.00	1076.50	85.91	97.22

Tabla 18. Poder calorífico aceite de Grasa animal.

Poder calorífico Diesel	Poder calorífico Grasa animal
[KJ/Kg combustible]	
42658	40044

Tabla 19. Energía masa combustible Grasa animal.

Mezcla	%	Poder calorífico inferior [kJ/Kg combustible]	Energía masa combustible (Emc) [KWh/Kg combustible]
B0	0%	42658	11.85
B5	5%	42527.3	11.81
B20	20%	42135.2	11.70
B80	80%	40566.8	11.27

Tabla 20. Factor de emisión por unidad de masa MP Grasa animal.

Factor de emisión por unidad de masa (FEum) [Kg MP/Kg combustible]												
	E1			E2			E3			Promedio		
	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1
MP B0	3.8E-05	3.5E-05	3.4E-05	2.4E-05	2.3E-05	2.2E-05	2.0E-05	1.9E-05	1.9E-05	2.7E-05	2.6E-05	2.5E-05
MP B5	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	8.1E-06	8.1E-06	8.1E-06				9.3E-06	9.3E-06	9.2E-06
MP B20	7.5E-06	7.4E-06	7.4E-06	7.3E-06	7.3E-06	7.3E-06	7.4E-06	7.4E-06	7.4E-06	7.4E-06	7.4E-06	7.4E-06
MP B80	4.1E-06	4.1E-06	4.1E-06	3.3E-06	3.3E-06	3.2E-06	4.0E-06	4.0E-06	4.0E-06	3.8E-06	3.8E-06	3.8E-06

Tabla 21. Factor de emisión por unidad de energía MP Grasa animal.

Factor de emisión por unidad de energía (FEum) [Kg MP/KWh]												
	E1			E2			E3			Promedio		
	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1
MP B0	3.2E-06	3.0E-06	2.8E-06	2.0E-06	1.9E-06	1.9E-06	1.7E-06	1.6E-06	1.6E-06	2.3E-06	2.2E-06	2.1E-06
MP B5	8.8E-07	8.7E-07	8.7E-07	6.9E-07	6.9E-07	6.9E-07				7.9E-07	7.8E-07	7.8E-07
MP B20	6.4E-07	6.4E-07	6.3E-07	6.3E-07	6.3E-07	6.2E-07	6.3E-07	6.3E-07	6.3E-07	6.3E-07	6.3E-07	6.3E-07
MP B80	3.6E-07	3.6E-07	3.6E-07	2.9E-07	2.9E-07	2.9E-07	3.6E-07	3.6E-07	3.6E-07	3.3E-07	3.3E-07	3.3E-07

Aceite de Palma

Tabla 22. Consumo combustible Palma.

	Consumo combustible Palma [g]						
Balanza	Ensayo						
Mezcla	Frio	E1	E2	E3	Promedios calientes	DE	IC 95%
B0	1012.5	945.6	892.8	881.8	906.7	34.1	38.6
B5	1037.0	905.0	873.4	849.6	876.0	27.8	31.4
B20	1026.6	867.8	921.9	831.3	873.7	45.6	51.6
B80	1115.1	956.2	944.4	1079.6	993.4	74.9	84.7

Tabla 23. Poder calorífico aceite de Palma.

Poder calorífico Diesel	Poder calorífico Palma
[KJ/Kg combustible]	
42658	37218

Tabla 24. Energía masa combustible Palma.

Mezcla	%	Poder calorífico inferior [KJ/Kg combustible]	Energía masa combustible (Emc) [KWh/Kg combustible]
B0	0%	42658	11.8
B5	5%	42386	11.8
B20	20%	41570	11.5
B80	80%	38306	10.6

Tabla 25. Factor de emisión por unidad de masa MP Palma.

Factor de emisión por unidad de masa (FEum) [Kg MP/Kg combustible]												
	E1			E2			E3			Promedio		
	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1
MP B0	3.9E-05	3.6E-05	3.5E-05	2.5E-05	2.4E-05	2.4E-05	2.1E-05	2.1E-05	2.0E-05	2.9E-05	2.7E-05	2.6E-05
MP B5	8.5E-06	8.4E-06	8.3E-06	6.8E-06	6.8E-06	6.6E-06	7.9E-06	7.8E-06	7.6E-06	7.7E-06	7.7E-06	7.5E-06
MP B20	7.6E-06	7.5E-06	7.4E-06	5.0E-06	5.0E-06	4.9E-06	6.4E-06	6.4E-06	6.3E-06	6.3E-06	6.3E-06	6.2E-06
MP B80	4.2E-06	4.2E-06	4.1E-06	3.9E-06	3.9E-06	3.7E-06	2.6E-06	2.6E-06	2.6E-06	3.6E-06	3.5E-06	3.4E-06

Tabla 26. Factor de emisión por unidad de energía MP Palma.

Factor de emisión por unidad de energía (FEum) [Kg MP/KWh]												
	E1			E2			E3			Promedio		
	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1
MP B0	3.3E-06	3.1E-06	2.9E-06	2.1E-06	2.1E-06	2.0E-06	1.8E-06	1.7E-06	1.7E-06	2.4E-06	2.3E-06	2.2E-06
MP B5	7.2E-07	7.2E-07	7.1E-07	5.8E-07	5.7E-07	5.6E-07	6.7E-07	6.6E-07	6.5E-07	6.6E-07	6.5E-07	6.4E-07
MP B20	6.6E-07	6.5E-07	6.4E-07	4.3E-07	4.3E-07	4.2E-07	5.5E-07	5.5E-07	5.4E-07	5.5E-07	5.4E-07	5.3E-07
MP B80	4.0E-07	3.9E-07	3.8E-07	3.7E-07	3.6E-07	3.5E-07	2.5E-07	2.5E-07	2.4E-07	3.3E-07	3.3E-07	3.2E-07

Aceite de Soya

Tabla 27. Consumo combustible Soya.

	Consumo combustible FAME Soya [g]						
Balanza	Ensayo						
Mezcla	Frio	E1	E2	E3	Promedios calientes	DE	IC 95%
B0	1222.7	971.8	955.3	953.8	960.3	10.0	11.3
B5	1192.7	1032.0	978.9	981.1	997.3	30.0	34.0
B20							
B80							

Tabla 28. Poder calorífico aceite de Soya.

Poder calorífico Diesel	Poder calorífico Soya
[KJ/Kg combustible]	
42658	39992

Tabla 29. Energía masa combustible Soya.

Mezcla	%	Poder calorífico inferior [KJ/Kg combustible]	Energía masa combustible (Emc) [KWh/Kg combustible]
B0	0%	42658	11.85
B5	5%	42525	11.81
B20	20%	42125	11.70
B80	80%	40525	11.26

Tabla 30. Factor de emisión por unidad de masa MP Soya.

Factor de emisión por unidad de masa (FEum) [Kg MP/Kg combustible]												
	E1			E2			E3			Promedio		
	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1
MP B0	3.8E-05	3.5E-05	3.4E-05	2.4E-05	2.3E-05	2.2E-05	2.0E-05	1.9E-05	1.9E-05	2.7E-05	2.6E-05	2.5E-05
MP B5	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	5.2E-06	5.2E-06	5.2E-06	5.1E-06	5.1E-06	5.0E-06	5.1E-06	5.1E-06	5.1E-06
MP B20												
MP B80												

Tabla 31. Factor de emisión por unidad de energía MP Soya.

Factor de emisión por unidad de energía (FEum) [Kg MP/KWh]												
	E1			E2			E3			Promedio		
	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1	MP10	MP2.5	MP1
MP B0	3.2E-06	3.0E-06	2.8E-06	2.0E-06	1.9E-06	1.9E-06	1.7E-06	1.6E-06	1.6E-06	2.3E-06	2.2E-06	2.1E-06
MP B5	4.3E-07	4.2E-07	4.2E-07	4.4E-07	4.4E-07	4.4E-07	4.3E-07	4.3E-07	4.3E-07	4.3E-07	4.3E-07	4.3E-07
MP B20												
MP B80												

3.1.2 Gravimetría

En la siguiente sección se presentará una serie de tablas con los resultados obtenidos por medición gravimétrica. Como en el caso del análisis transiente, se ejemplificará con un biocombustible para luego presentar toda la información para las distintas mezclas y biocombustibles en la sección 6.6 Anexo F.

La principal distinción aquí es que la partida en frío tienen un impacto más notorio en las emisiones de PTS en comparación con los ciclos en caliente, por lo que se presentó un gráfico particular para ilustrar los resultados gravimétricos de los filtros, dado su sensibilidad en esta etapa temprana del ciclo de conducción. Esto se realiza para cada mezcla de biocombustible, y para el caso de los filtros MP 2.5 estarán vinculados a graficas de partidas en caliente, donde las condiciones iniciales son más estandarizadas.

La Ilustración 3.11 representa las partículas totales para las partidas en frío, cabe destacar que existen 3 filtros para un mismo ensayo en frío, el primer filtro recolectara el PTS para el primer urbano, de gran importancia para las partidas en frío ya que es el momento donde las condiciones están menos favorables o más susceptibles a la generación de particulado, un segundo filtro recolectara los ciclos urbanos restantes desde el 2 al 4 y finalmente un filtro que recolecta el ciclo extra urbano.

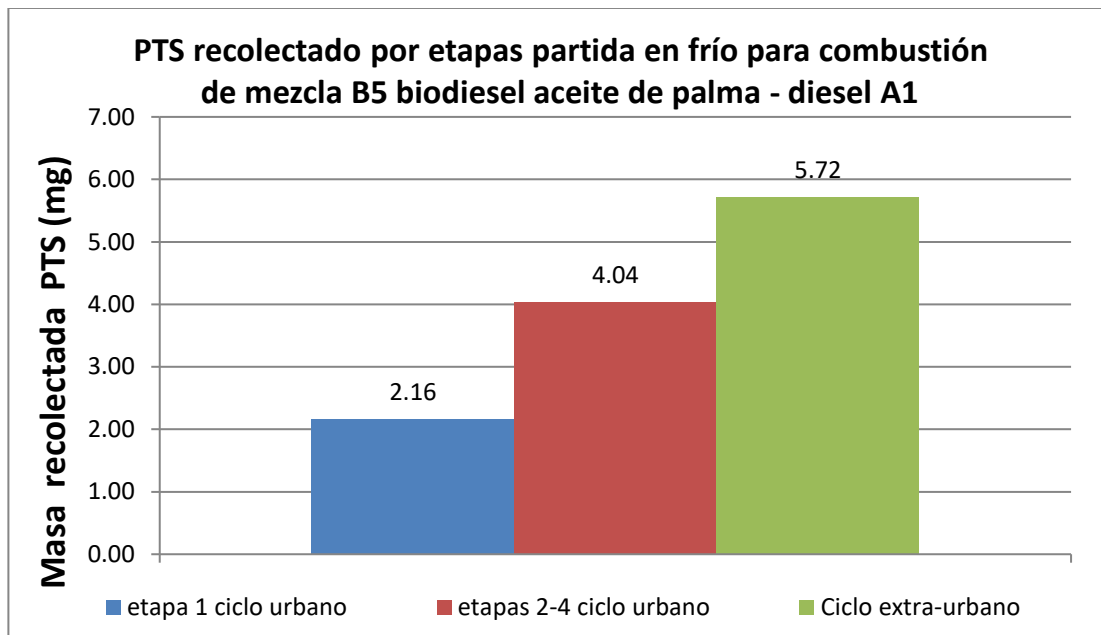


Ilustración 3.11 Gravimetría PTS partida en frío Aceite de Palma B5. (Fuente propia)

La siguiente tabla muestra la cantidad de particulado MP 2.5 generado en los ciclos de conducción con partidas en caliente, se grafican los tres ensayos para comparar la repetitividad.

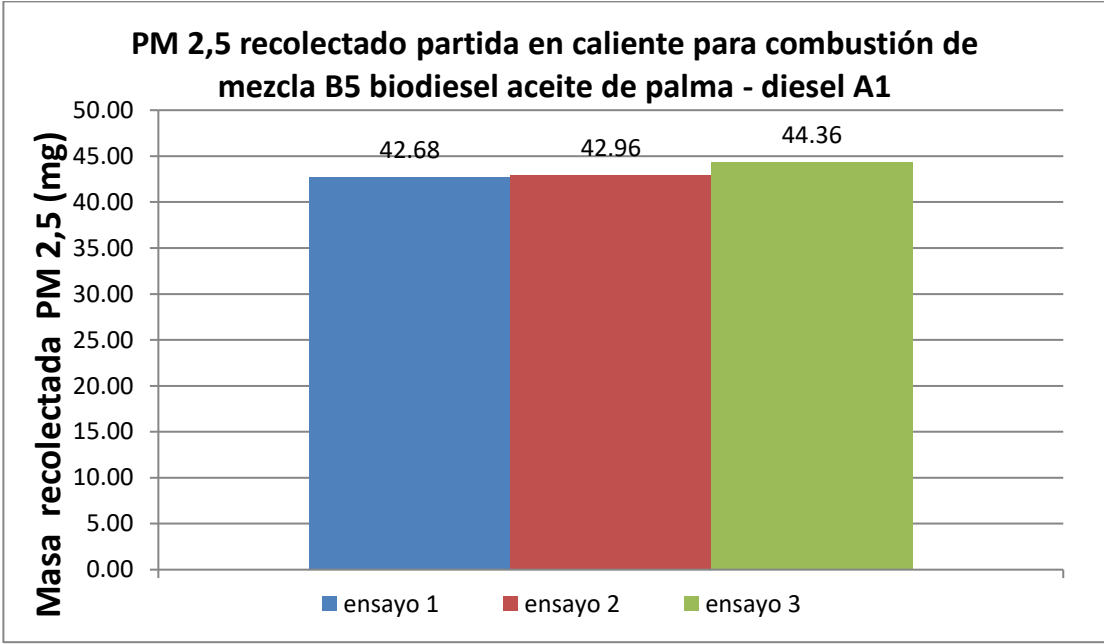


Ilustración 3.12 Gravimetría PM2.5 partida en caliente Aceite de Palma B5. (Fuente propia)

Para este caso se compara entre mezclas utilizando los promedios de los ensayos de las gráficas anteriormente mostradas, se presentan los resultados de todos los biocombustibles para sus distintas mezclas.

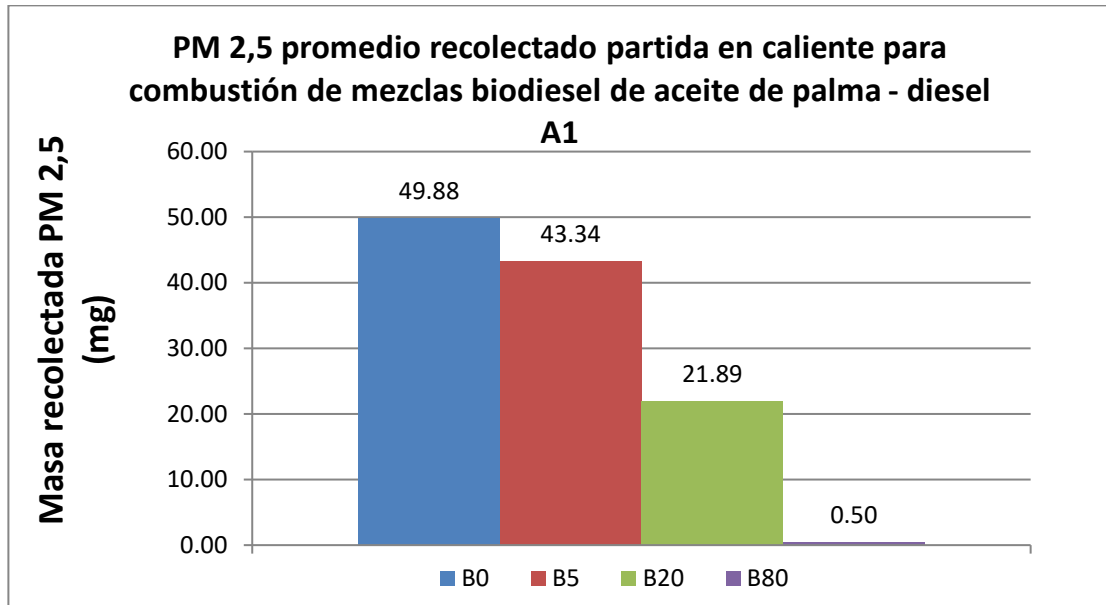


Ilustración 3.13 Gravimetría promedio PM2.5 partida en caliente Palma. (Fuente propia)

Acá vemos la representación de las emisiones de PM2.5 para el total del ciclo, corregido por su factor de dilución para encontrar la real generación de este durante el ciclo, además de su generación por kg de combustible.

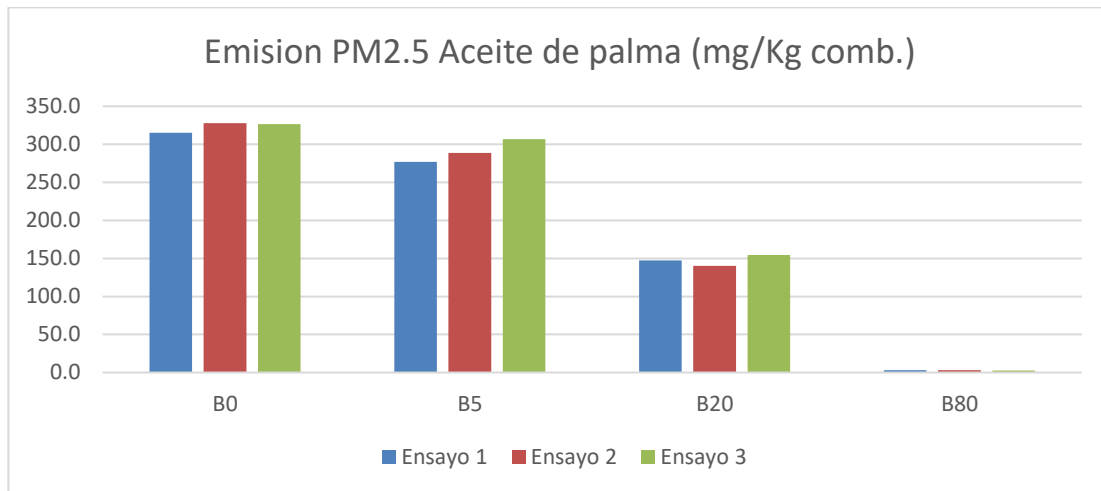


Ilustración 3.14 Emisión por ensayos PM2.5 aceite de Palma. (Fuente propia)

Y a continuación el promedio de la Ilustración 3.14.

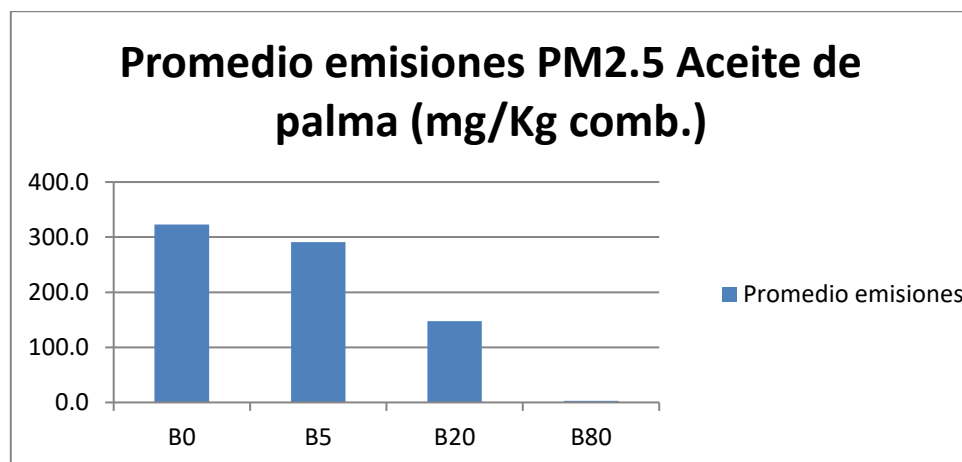


Ilustración 3.15 Emisión promedio PM2.5 Aceite de Palma. (Fuente propia)

Comparación emisión gravimétrica.

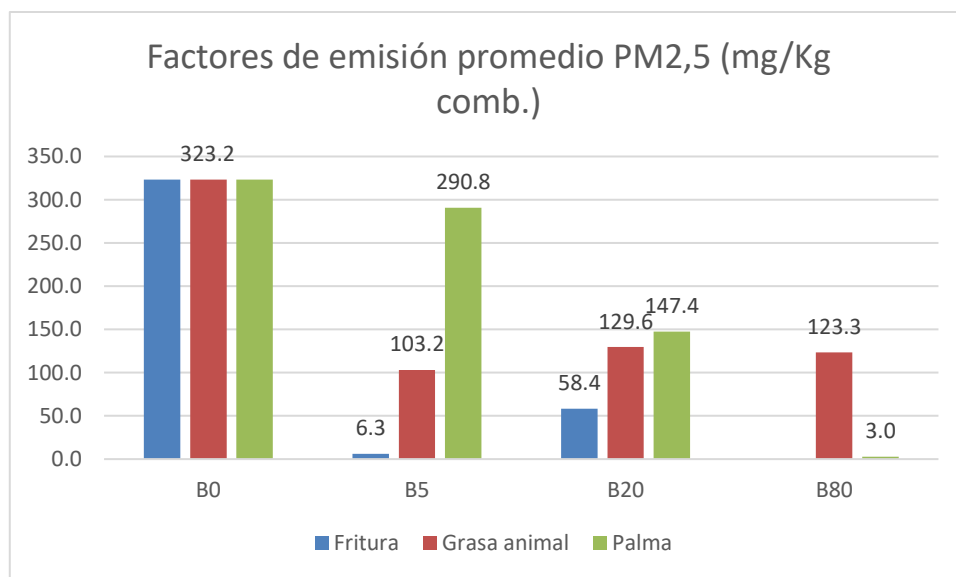


Ilustración 3.16. Comparación factores de emisión promedio para distintos biocombustibles. (Fuente propia)

En la Ilustración 3.16 se presenta una comparación de los promedios de los factores de emisión para PM2.5 en medición por gravimetría para los distintos biocombustibles, teniendo el siguiente análisis:

Aceite de Fritura:

Se observa una reducción drástica en los factores de emisión de PM2.5 al pasar de B0 a B5 (de 323.2 a 6.3 mg/Kg), lo que indica una reducción significativa de emisiones con una mezcla pequeña de biocombustible.

Sin embargo, al aumentar la proporción de biocombustible a 20% (B20), las emisiones incrementan a 58.4 mg/Kg. Esto sugiere que una pequeña cantidad de aceite de fritura reduce notablemente las emisiones, pero mayores concentraciones no mantienen este beneficio.

Grasa Animal:

Las mezclas con grasa animal muestran una tendencia diferente. Aunque las emisiones disminuyen significativamente de B0 (323.2 mg/Kg) a B5 (103.2 mg/Kg), estas incrementan nuevamente a B20 (129.6 mg/Kg). Al aumentar la proporción de biocombustible a 80% (B80), las emisiones vuelven a reducirse a 123.3 mg/Kg.

Aceite de Palma:

Las mezclas con aceite de palma muestran una reducción menor en las emisiones al pasar de B0 a B5 (de 323.2 a 290.8 mg/Kg), lo que indica que el aceite de palma no es tan efectivo como los otros dos biocombustibles en reducir las emisiones en bajas concentraciones. No obstante, al incrementar la proporción de biocombustible a 20% (B20), las emisiones disminuyen a 147.4 mg/Kg. Con una proporción de 80% de biocombustible (B80), las emisiones caen drásticamente a 3.0 mg/Kg, indicando una gran eficiencia del aceite de palma en altas concentraciones.

3.2 Black Carbon

Antes de obtener los resultados de BC emitidos durante el ciclo de conducción se obtienen los resultados de las gráficas para cada mezcla comparadas en un gráfico para observar la repetitividad del ensayo, como se muestra en la Ilustración 3.17, luego de esto se obtiene un gráfico promedio de los tres ensayos que se hacen por mezcla, Ilustración 3.18.

Los gráficos para todos los biocombustibles y sus distintas mezclas se encuentran en 6.3.4 Anexo D.

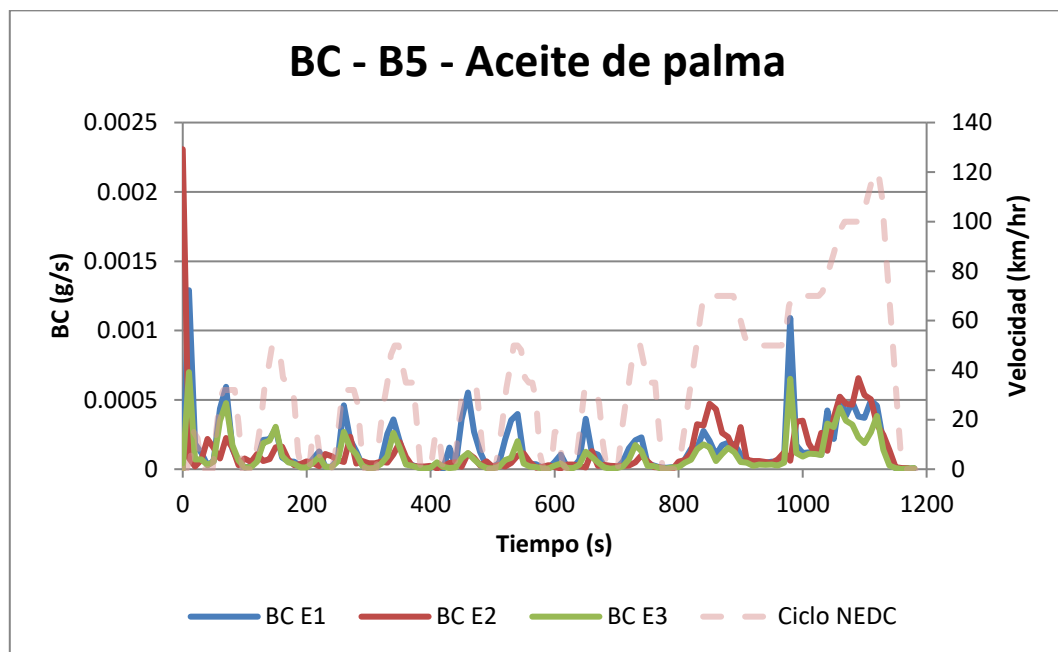


Ilustración 3.17 Gráfico BC – B5 – Aceite de palma, repetitividad ensayos. (Fuente propia)

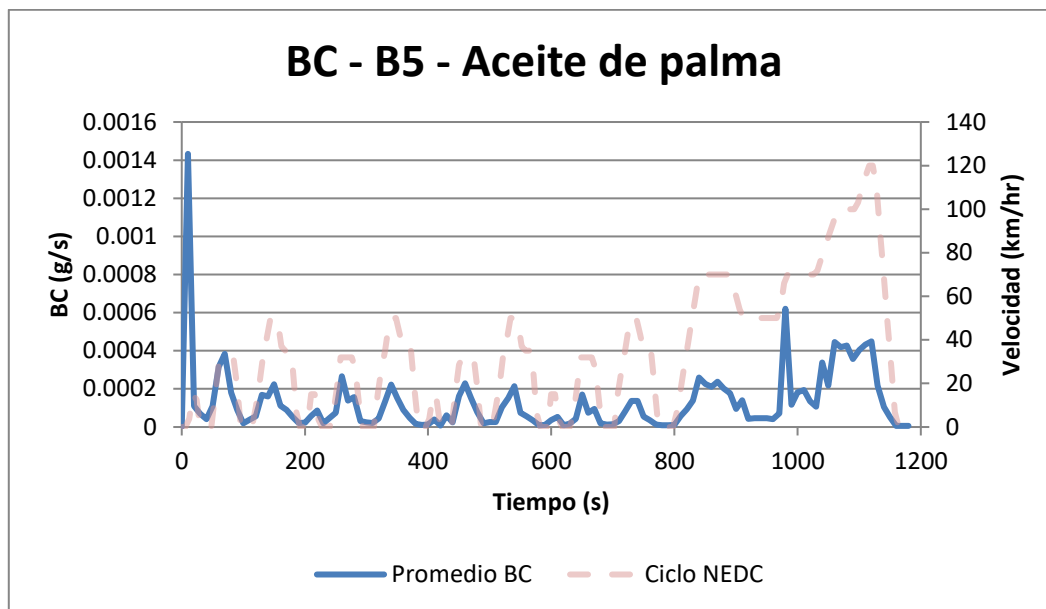


Ilustración 3.18 Gráfico promedio BC – B5 – Aceite de palma. (Fuente propia)

Una vez teniendo esto se genera un gráfico que refleja el MP acumulado en el tiempo, siguiendo la metodología explicada en 2.4.2 para cada repetición de la mezcla, para observar su repetitividad y apreciar en que zonas hay un aumento más marcado de las emisiones, en la Ilustración 3.19 se observa lo anteriormente mencionado, por último se expone el grafico promediado de las emisiones acumuladas en el tiempo, Ilustración 3.20.

Los gráficos para todos los biocombustibles y sus distintas mezclas se encuentran en 6.3.4 Anexo D.

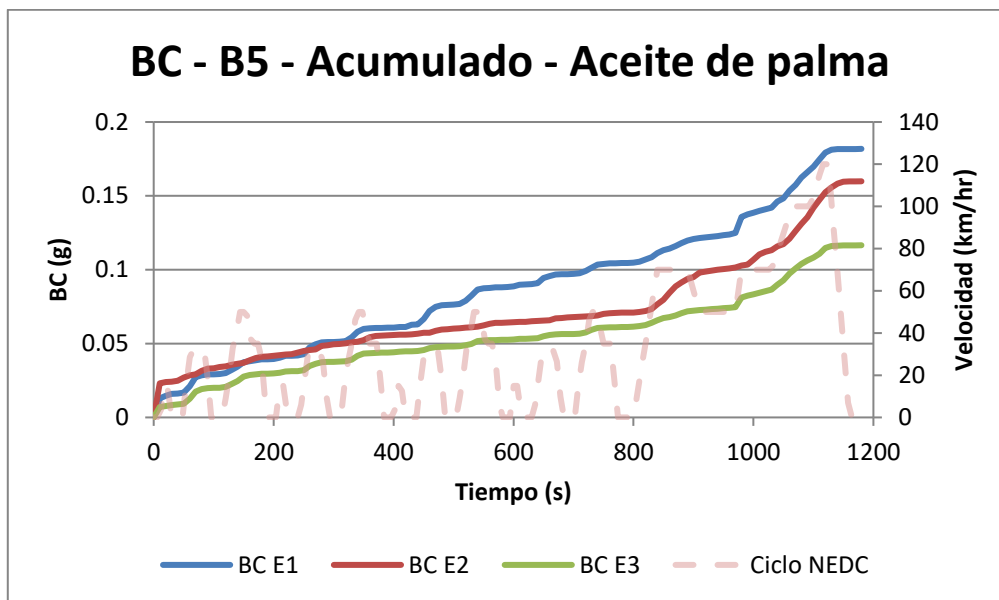


Ilustración 3.19 Gráfico emisión acumulada BC – B5 – Aceite de palma, repetitividad ensayos. (Fuente propia)

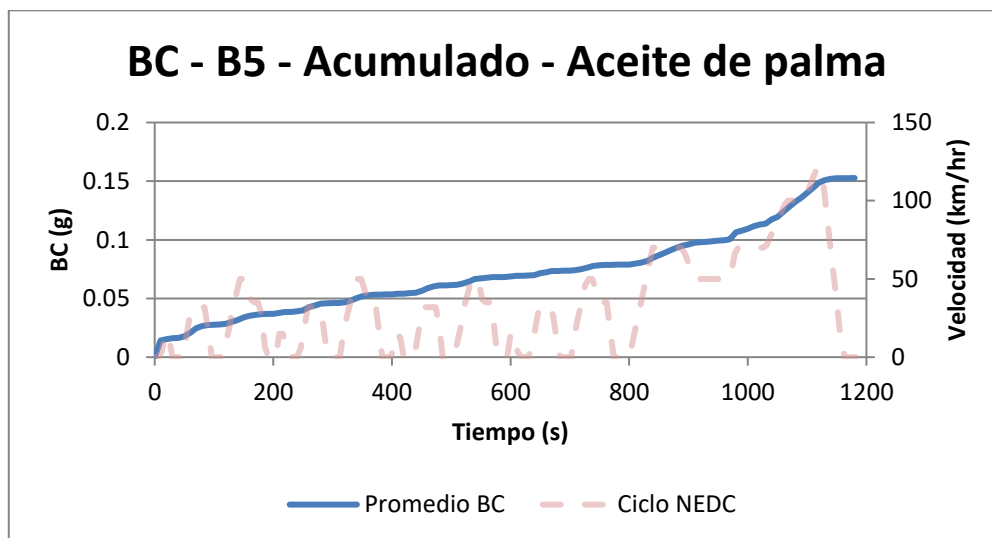


Ilustración 3.20 Gráfico promedio acumulado BC – B5 – Aceite de palma. (Fuente propia)

También se realizó una comparación entre el promedio de las emisiones en transiente contra la de los ensayos en frío, para observar su variación, en la Ilustración 3.21 se expresa, y se encuentra esta comparación en el Anexo E para todos los biocarburantes y sus distintas mezclas.

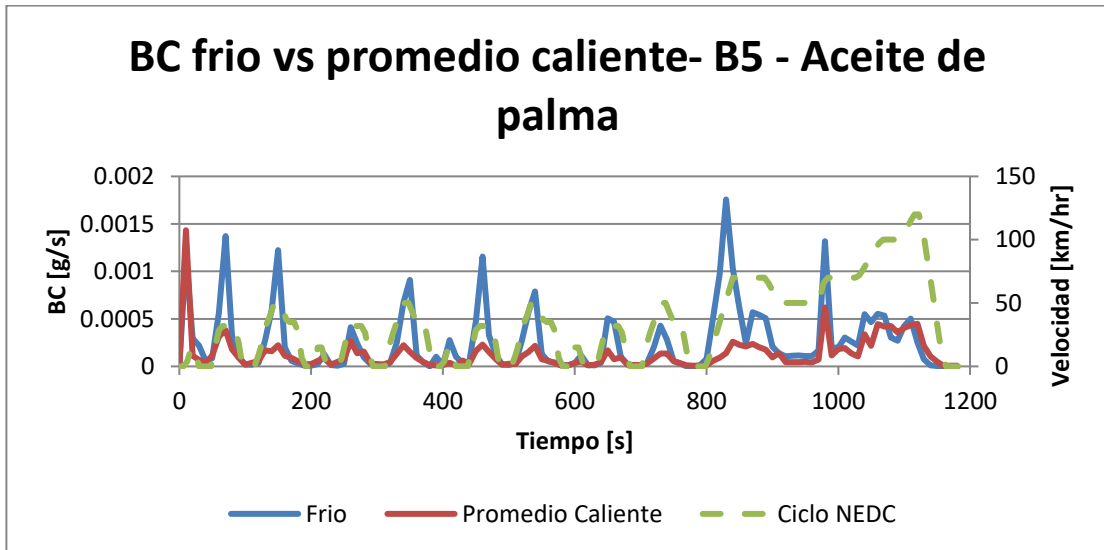


Ilustración 3.21 Grafico por granulometría de promedio vs frio. (Fuente propia)

A continuación, se presenta el grafico resumen del promedio de las emisiones de BC en transiente acumulada durante el ciclo para todas las mezclas siguiendo la metodología descrita en la sección 2.4.2, se entrega un gráfico para cada biocombustible:

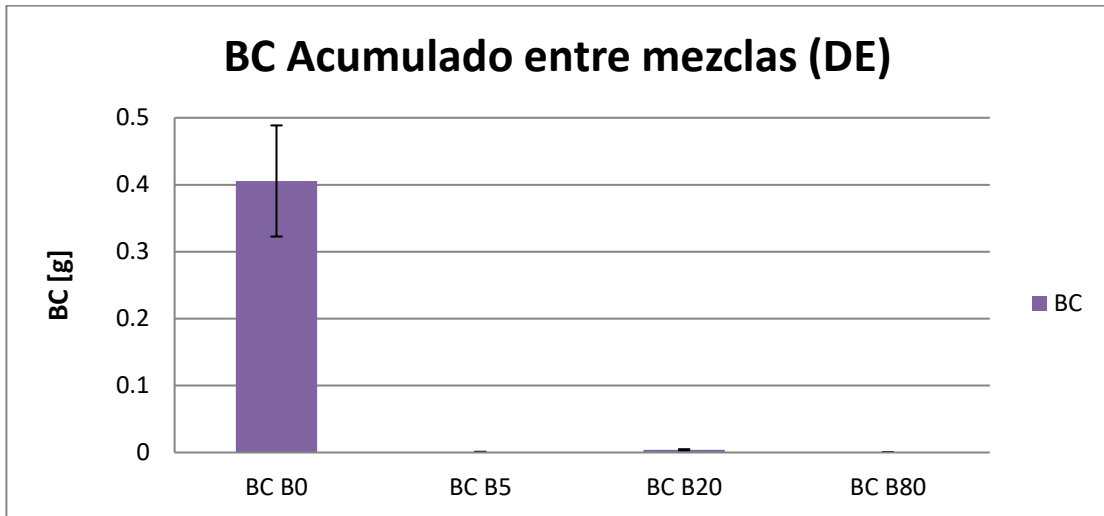


Ilustración 3.22 Comparación entre mezclas BC, aceite de fritura. (Fuente propia)

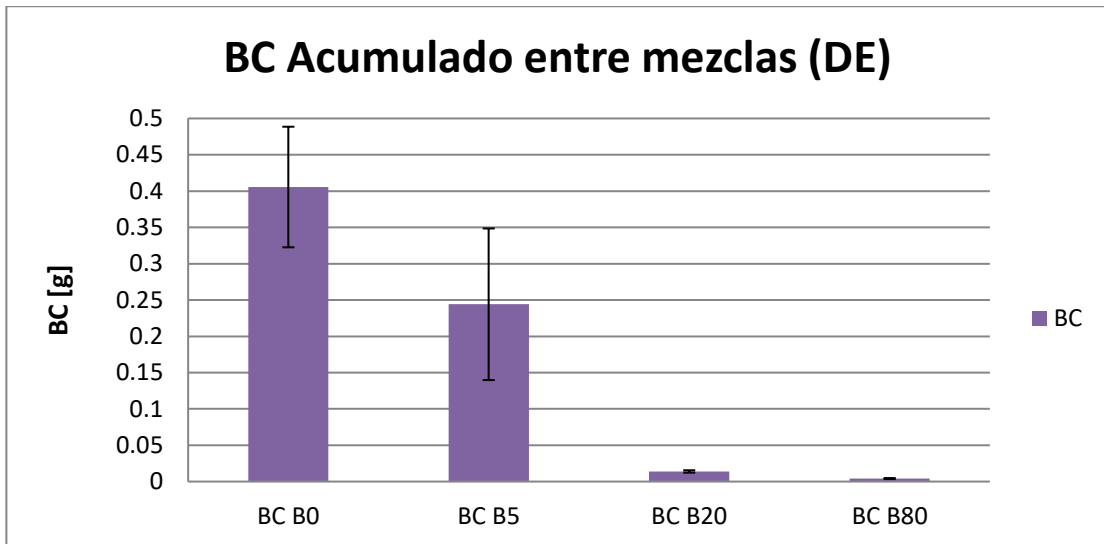


Ilustración 3.23 Comparación entre mezclas BC, grasa animal. (Fuente propia)

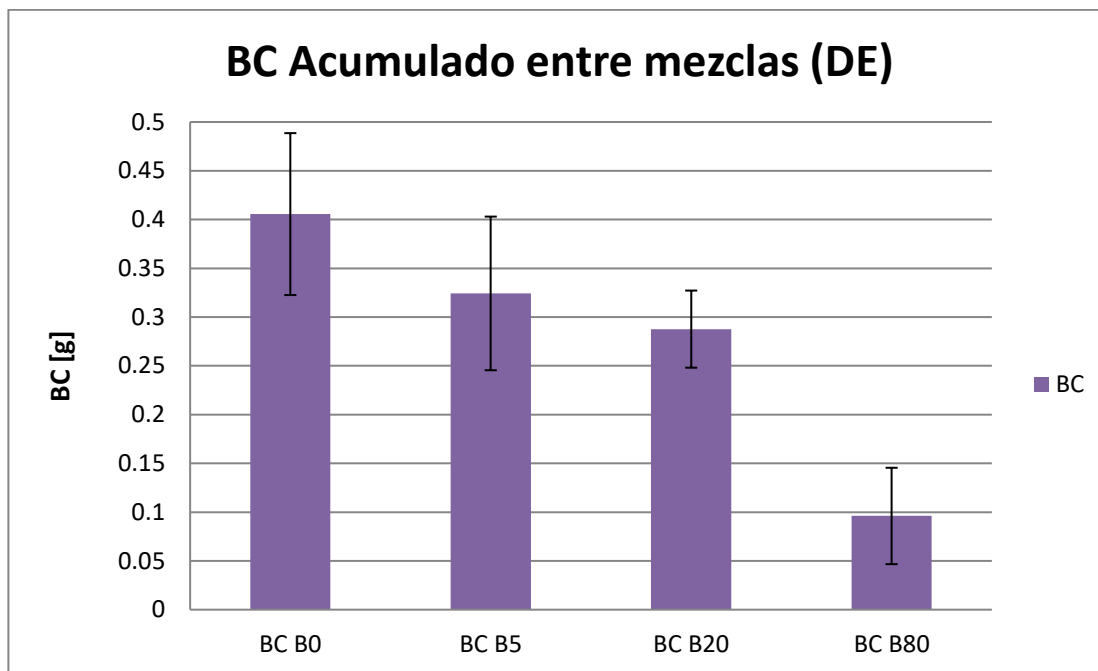


Ilustración 3.24 Comparación entre mezclas BC, aceite de palma. (Fuente propia)

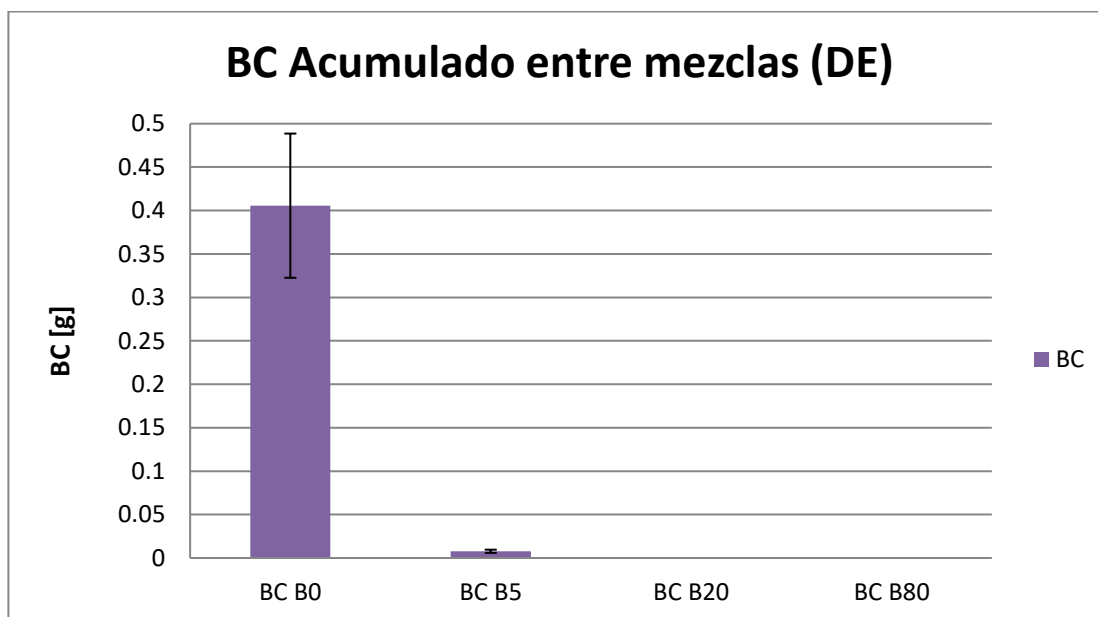


Ilustración 3.25 Comparación entre mezclas BC, aceite de soya. (Fuente propia)

Cualitativamente de las Ilustración 3.22, Ilustración 3.23, Ilustración 3.24e Ilustración 3.25 se desprende lo siguiente:

- Tendencias de las emisiones con la proporción de biocombustible:

Se observa que las emisiones de BC tienden a disminuir a medida que aumenta la proporción de biocombustible en la mezcla. Esta tendencia es transversal a todos los biocombustibles. Se observa que la caída en la emisión para los biocombustibles de Fritura y Soya es abrupta, además que se observa un leve aumento en la emisión de BC entre B5 y B20 para aceite de Fritura.

- Comparación entre biocombustibles:

El biocombustible de Fritura parece ser el más efectivo en la reducción de las emisiones de BC en todas las proporciones de mezcla, seguido por el de Grasa animal y aceite de Palma. El biocombustible de aceite de soya presenta la segunda mayor disminución de BC si limitamos el análisis solo a la mezcla de B5.

Ahora, cuantitativamente tenemos lo siguiente:

- Análisis numérico de emisiones e identificación de mejoras significativas

Basado en los promedios de emisiones de BC para cada biocombustible y proporción de mezcla, se puede calcular la reducción promedio de las emisiones de BC para cada biocombustible en comparación con el diésel puro (B0) en diferentes proporciones de mezcla. Esto permitirá identificar qué mezclas muestran las mayores mejoras en términos de emisiones de BC. A continuación, se presentan una tabla que muestra lo mencionado para los 4 biocombustibles:

Tabla 32 Resumen emisiones BC.

Emisión BC promedio [gr]				
Mezclas	Fritura	Grasa	Palma	Soya
BC B0	0.4055875	0.4055875	0.4055875	0.4055875
BC B5	0.00079958	0.2441332	0.32424243	0.00773118
BC B20	0.00392234	0.01390574	0.2876271	0
BC B80	0	0.00413995	0.09607718	0
B0-B5	-99.8%	-39.8%	-20.1%	-98.1%
B0-B20	-99.0%	-96.6%	-29.1%	
B0-B80		-99%	-76%	

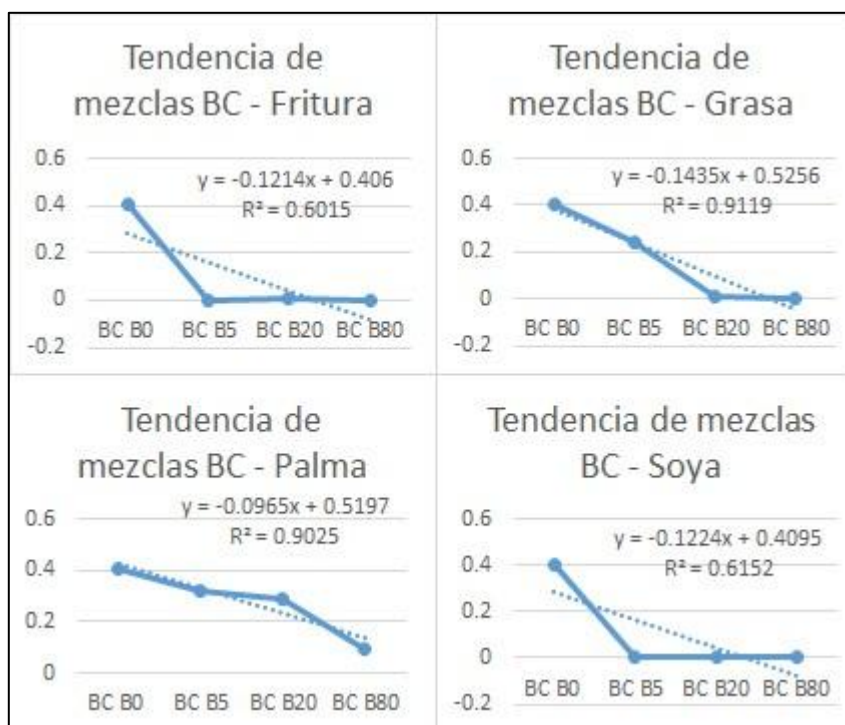


Ilustración 3.26. Tendencias de mezclas en BC. (Fuente propia)

Si consideramos la disminución porcentual entre mezclas tomando como base al diésel o B0, tendríamos que la mayor disminución porcentual está dada por la comparación entre B0 y B5 para la mezcla de Fritura y Soya, la correlación de los datos de estos dos está muy por debajo de lo deseable, sin embargo por sí solo el coeficiente de determinación no es suficiente para evaluar el ajuste de un modelo, siempre es útil considerar otros aspectos como la significancia estadística de los coeficientes, la validez de los supuestos del modelo y la interpretación práctica de los resultados. Esta disminución se mantiene en el B0-B20 de las emisiones correspondientes a Fritura.

En el análisis de la variación de la emisión en el biocombustible de Grasa animal se ve una reducción progresiva desde un 39,9 % para B0-B5 a un 96,6 % en B0-B20 para finalmente obtener un 99 % de reducción en la comparación B0-B80. En este caso su factor de correlación corresponde a un 0,91.

Por último, en el aceite de Palma igualmente se tiene una reducción progresiva de un 20,1 %, 29,1 % y un 76 % para las comparaciones de B0-5, B0-B20 y B0-B80 respectivamente. En este caso su factor de correlación es de un 0.90.

- Evaluación de efectos nulos:

Se tiene que existe una mínima reducción de la emisión en el aceite de Fritura en la comparación de B0-B5 y B0-20, además de presentar una drástica disminución de la emisión de BC con respecto al diésel.

Factores de emisión

En esta sección se ponen a disposición las tablas de “Factor de emisión por unidad de masa” y “Factor de emisión por unidad de energía”. Como se menciona en el capítulo 3.1.1 estas son alimentada por las tablas de emisiones, en este caso de BC, y por las tablas de consumos de combustible, los valores de poder calorífico y la energía por masa de combustible, de igual forma se separan por tipo de biocombustible.

Aceite de fritura

Tabla 33. Factor de emisión por unidad de masa BC Fritura.

Factor de emisión por unidad de masa (FEum) [Kg MP/Kg combustible]				
	E1	E2	E3	Promedio
BC B0	0.00049239	0.000425479	0.000347867	0.00042235
BC B5	5.7608E-07	1.15342E-06	7.46223E-07	8.2459E-07
BC B20	3.2983E-06	3.73707E-06	5.16877E-06	4.0594E-06
BC B80				

Tabla 34. Factor de emisión por unidad de energía BC Fritura.

Factor de emisión por unidad de energía (FEum) [Kg MP/KWh]				
	E1	E2	E3	Promedio
BC B0	4.1554E-05	3.59071E-05	2.93572E-05	3.5643E-05
BC B5	4.8858E-08	9.78228E-08	6.32878E-08	6.9935E-08
BC B20	2.8396E-07	3.21732E-07	4.44991E-07	3.4948E-07
BC B80				

Grasa animal

Tabla 35. Factor de emisión por unidad de masa BC Grasa animal.

Factor de emisión por unidad de masa (FEum) [Kg MP/Kg combustible]				
	E1	E2	E3	Promedio
BC B0	0.00049239	0.00042548	0.00034787	0.00042235
BC B5	0.00031681	0.00014476	0.00026461	0.00024298
BC B20	1.5184E-05	1.3087E-05	1.3554E-05	1.396E-05
BC B80	3.8362E-06	4.1435E-06	3.5208E-06	3.8457E-06

Tabla 36. Factor de emisión por unidad de energía BC Grasa animal.

Factor de emisión por unidad de energía (FEum) [Kg MP/Kwh]				
	E1	E2	E3	Promedio
BC B0	4.1554E-05	3.5907E-05	2.9357E-05	3.5643E-05
BC B5	2.6818E-05	1.2254E-05	2.24E-05	2.0569E-05
BC B20	1.2973E-06	1.1182E-06	1.1581E-06	1.1927E-06
BC B80	3.4044E-07	3.6771E-07	3.1245E-07	3.4128E-07

Aceite de palma

Tabla 37. Factor de emisión por unidad de masa BC Palma.

Factor de emisión por unidad de masa (FEum) [Kg MP/Kg combustible]				
	E1	E2	E3	Promedio
BC B0	0.00050604	0.00045526	0.00037627	0.00044731
BC B5	0.00042295	0.00039237	0.00029103	0.00037014
BC B20	0.00034553	0.00026924	0.0003787	0.00032922
BC B80	0.00015286	6.9877E-05	7.047E-05	9.6716E-05

Tabla 38. Factor de emisión por unidad de energía BC Palma.

Factor de emisión por unidad de energía (FEum) [Kg MP/KWh]				
	E1	E2	E3	Promedio
BC B0	4.2705E-05	3.8421E-05	3.1754E-05	3.7749E-05
BC B5	3.5917E-05	3.3319E-05	2.4714E-05	3.1432E-05
BC B20	2.9902E-05	2.33E-05	3.2773E-05	2.8491E-05
BC B80	1.4322E-05	6.5472E-06	6.6028E-06	9.0619E-06

Aceite de soya

Tabla 39. Factor de emisión por unidad de masa BC Soya.

Factor de emisión por unidad de masa (FEum) [Kg MP/Kg combustible]				
	E1	E2	E3	Promedio
BC B0	0.00049239	0.00042548	0.00034787	0.00042235
BC B5	9.2061E-06	7.5535E-06	6.42E-06	7.7519E-06
BC B20				
BC B80				

Tabla 40. Factor de emisión por unidad de energía BC Soya.

Factor de emisión por unidad de energía (FEum) [Kg MP/Kwh]				
	E1	E2	E3	Promedio
BC B0	4.1554E-05	3.5907E-05	2.9357E-05	3.5643E-05
BC B5	7.7936E-07	6.3946E-07	5.435E-07	6.5625E-07
BC B20				
BC B80				

4 Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones generales

El crecimiento continuo de la población y el incremento de las necesidades de producción y movilidad han intensificado el consumo de recursos, resultando en una mayor demanda energética. Esta situación ha llevado a un aumento significativo en la generación de contaminantes derivados de la producción de energía, impactando negativamente el clima, la salud pública, el ambiente y la sociedad en general.

Enfrentando el desafío del cambio climático, es imperativo reducir las emisiones contaminantes para evitar daños irreversibles al planeta. En este contexto, Chile se encuentra evaluando alternativas más sostenibles para ampliar su matriz energética. Entre estas alternativas, los biocombustibles emergen como una opción prometedora para sectores clave como la movilidad vehicular, aunque presentan varias incertidumbres sobre su implementación y efectividad.

Este estudio se centra en determinar experimentalmente las emisiones de material particulado (MP) y carbono negro (BC) en un motor diésel utilizando diversas mezclas de biocombustible. A través de pruebas en un dinamómetro de chasis, se ha generado una base de datos sobre las emisiones de estos contaminantes, proporcionando información crucial para la toma de decisiones en políticas públicas. Los resultados muestran que las emisiones de MP y BC tienden a disminuir con mayores proporciones de biocombustible en la mezcla. En particular:

- Biocombustible de aceite de fritura reciclado: Demostró ser el más efectivo en reducir las emisiones en proporciones de B5 (5% biocombustible, 95% diésel) y B20 (20% biocombustible, 80% diésel).

- Biocombustible de aceite de palma: Ofreció una reducción intermedia de emisiones, aunque plantea desafíos éticos y ambientales relacionados con su producción.
- Biocombustible de grasa animal: Mostró un buen desempeño en términos de reducción de contaminantes, pero su disponibilidad depende de fuentes locales de materia prima.
- Biocombustible de soya: La falta de datos completos limita un análisis exhaustivo, aunque preliminarmente ofrece beneficios similares.

Estas alternativas, específicamente diseñadas para motores diésel, son particularmente relevantes para el transporte pesado y flotas comerciales, donde la electrificación presenta barreras técnicas y económicas significativas. Al 2025, Chile proyecta promover el uso de biocombustibles en estos segmentos como parte de su estrategia de descarbonización.

Sin embargo, los biocombustibles no son la única solución contemplada. El país también está liderando iniciativas en el desarrollo de hidrógeno verde, considerado una fuente energética limpia y versátil que podría complementar y, en algunos casos, superar las capacidades de los biocombustibles en términos de sostenibilidad y reducción de emisiones. Además, otras tecnologías emergentes, como los combustibles sintéticos producidos a partir de CO₂ capturado y los biogases generados a partir de residuos orgánicos, están siendo estudiadas para sectores específicos de movilidad.

Este estudio no solo valida el uso de biocombustibles como una solución viable para reducir las emisiones, sino que también subraya la necesidad de continuar investigando y optimizando su aplicación en conjunto con otras tecnologías emergentes. De este modo, Chile puede alcanzar una mayor sostenibilidad energética y ambiental,

cumpliendo con sus compromisos internacionales y contribuyendo activamente a la mitigación del cambio climático.

4.2 Conclusiones específicas

1.1 En resumen, el texto destaca la preocupación por el MP y el BC emitido por motores de combustión interna de encendido por compresión. Estas partículas, generadas tanto en la cámara de combustión como en el sistema de escape, representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Las partículas finas, en particular, pueden penetrar en los pulmones, causando daños significativos y problemas respiratorios, especialmente en individuos con afecciones preexistentes.

Se enfatiza la complejidad de la composición del MP, clasificado en cinco fracciones distintivas, y se describe cómo estas fracciones se forman en el proceso de combustión y emisión. Además, se resalta la importancia de las fuentes emisoras, tanto naturales como antropogénicas.

La conclusión principal es que comprender la formación, composición y emisión de estas partículas es esencial para abordar los riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con los motores de combustión interna. La implementación de tecnologías eficientes para la reducción de partículas, así como la conciencia sobre las fuentes emisoras, son aspectos cruciales para abordar este problema ambiental y de salud pública.

1.1.1 Las partículas de aerosol pueden tener distintos diámetros y formas, al ser irregulares se expresan en términos de diámetro, diámetro aerodinámico. Su

distribución de tamaño pasa por su número, masa, volumen o su área. Los factores que influyen en su transporte y deposición son la termoforesis, difusión, inercia, sedimentación y atracción estática. Los aerosoles poseen una naturaleza proteica, dependiendo de las condiciones modifica su tamaño, su perfil, forma y composición.

1.1.2 La composición del MP en motores diésel provenientes de fuentes móviles tienen una distribución bimodal. La formación de MP se compone de cuatro fracciones, la fracción carbonosa, la fracción de cenizas, la fracción sulfatada y orgánicas. El BC aparecería en una relación crítica de aire-combustible, pero en la práctica esto no es derivable analíticamente, y no es universal: varía con la naturaleza del proceso de combustión como con la composición del combustible, la mezcla de aire con el combustible, y con la estructura de la llama.

1.1.3 Con respecto a la localización de la formación del MP sabemos que la acreción de los volátiles es observada cuando las temperaturas descienden por debajo de los 300°, afectando la morfología, la conglomeración no afecta, la acumulación y la oxidación a altas temperaturas podrían fragmentar la partícula. Las partículas se alojan rápidamente en sistemas de escape y se acumulan como depósitos en la pared, también en el catalítico.

Dentro de la pluma de escape reales, el gas es diluido linealmente, se presentan las nanopartículas al igual que en los laboratorios de dilución, y también responden a factores de saturación.

Dentro de la línea de transferencia hay que tener sumo cuidado con la interpretación de los datos ya que al ser el primer elemento artificial que se presenta en la emisión, conlleva una serie de factores que influyen tanto en la nucleación, como en el aumento de los volátiles, provocando aumentos en la saturación causando nucleación, algunos materiales ingenieriles desgasifican el material volátil.

Dentro del tubo de dilución el mecanismo que predomina es la termoforesis en la deposición en las paredes por el modo de acumulación, las pérdidas por difusión son importantes por debajo de los 100 [nm], con un esperado impacto en el modo de nucleación y en las mediciones de número de partículas.

En el filtro del túnel la eficiencia de filtrado es determinante, esta va aumentando inevitablemente a medida que se ensucia. La presión variable podría provocar que las especies volátiles de una a otras volátiles y se fuguen. Cuando aumenta la temperatura los volátiles se pierden, al igual como sucede durante la operación del motor en el transiente.

1.1.4 La caracterización de las partículas generadas describe como están compuestas. La caracterización física engloba la microestructura de las esférulas y morfología de las superestructuras llamadas aglomerados. La caracterización química engloba la distribución de composición de las 4 fracciones mencionadas anteriormente. La biológica hace referencia a la mutagenicidad bacteriana. Y por último la demográfica.

2. Metodología.

Para el estudio de las emisiones de MP y BC se utilizan una serie de procedimientos con distintas condiciones de trabajo, para obtener resultados reproducibles y actualizables, para ser de utilidad para la aceptación o rechazo de los biocombustibles por parte del estado.

2.1 Con respecto a los combustibles, se prueban una serie de biocombustibles de distintos orígenes, pero es necesario tener un combustible base con el cual se realizan las mezclas, el A-1.

2.2 El equipamiento usado es el tradicional de laboratorio o fuera de ruta, que corresponde a un dinamómetro de chasis. Donde se somete a un ciclo de conducción europeo (NEDC), el que se compone de 4 ciclos que simulan las condiciones de conducción en una zona urbana, y una última etapa llamada extraurbana, que representa condiciones de carretera.

2.3 Los métodos utilizados para realizar la medición del MP y el BC son por gravimetría y por espectrometría laser de aerosol para el MP, y un aetalometro para el caso del BC, estos métodos tienen como principio el análisis óptico que es de alta utilidad por su precisión en la medición de la cantidad de partículas y de su tamaño, por otra parte, el método gravimétrico otorga otro parámetro para poder comparar los métodos de medición, pero con los inconvenientes mencionados en el marco teórico.

2.4 En el procedimiento experimental y protocolos asociados a este tenemos una metodología de análisis para la emisión de MP basada en la emisión de partículas tomadas por el analizador Grimm, los volúmenes de mezcla, de escape y externo, el flujo de salida y nuestro factor de dilución.

Para la metodología de análisis de emisiones de BC tenemos algo similar al caso anterior con la particularidad que la medición se realiza con el analizador microAetalometro.

El FD cumple un rol importante ya que dependiendo de este valor y siendo directamente proporcional al valor de la emisión del particulado nos dará un valor más cercano a la realidad, si hacemos una analogía con la función de Weibull vendría siendo nuestro factor de escala.

El factor de dilución puede ir variando en el transiente ya que el volumen de los gases de escape es variable durante el ciclo de conducción.

3. Resultados

Transversalmente, se observa una disminución de las emisiones en términos de MP, tanto en su medición por granulometría (MP10, MP2.5, y MP1) como por gravimetría, así como en las emisiones de BC. Esta tendencia de reducción es consistente al aumentar la proporción de biocombustible en la mezcla, evidenciando que el uso de biocombustibles como aceite de fritura, aceite de palma, grasa animal y aceite de soya contribuye significativamente a la mejora de la calidad del aire. La reducción es especialmente notable en las mezclas con mayores proporciones de biocombustible, como B20 y B80, donde las emisiones de MP y BC disminuyen sustancialmente en comparación con el diésel puro (B0). Este análisis resalta la efectividad de los biocombustibles en la mitigación de contaminantes atmosféricos, subrayando su potencial como una alternativa más limpia al diésel convencional.

3.1.1 Análisis transiente MP

Las tendencias de las emisiones de MP muestran que, en general, estas tienden a disminuir a medida que aumenta la proporción de biocombustible en la mezcla. Esta tendencia es clara para los biocombustibles de fritura, aceite de palma y grasa animal, con reducciones consistentes en las emisiones de MP10, MP2.5 y MP1. Sin embargo, para el biocombustible de aceite de soya, la limitada disponibilidad de datos (solo para B5) impide un análisis completo de su relación con las emisiones de MP.

Comparando los diferentes biocombustibles, el aceite de fritura parece ser el más efectivo en la reducción de emisiones en todas las proporciones de mezcla, seguido por

el aceite de palma y la grasa animal. El biocombustible de soya muestra la mayor disminución de MP en la mezcla B5.

La efectividad de los biocombustibles en la reducción de emisiones puede variar según el tamaño de partícula. Algunos biocombustibles muestran mayor reducción en MP10 en comparación con MP2.5 y MP1, mientras que otros tienen efectos similares en todos los tamaños de partículas.

3.1.2 Gravimetría MP

Con lo que respecta a la eficiencia del biocombustible sabemos que el aceite de fritura es altamente eficiente en bajas concentraciones, pero su eficiencia disminuye con mayores concentraciones.

La grasa animal reduce las emisiones significativamente en bajas y altas concentraciones, aunque muestra un incremento intermedio en B20.

El aceite de palma es menos eficiente en bajas concentraciones, pero muestra una reducción sustancial en altas concentraciones (B80), sugiriendo una mayor efectividad cuando se utiliza en mayor proporción.

3.2 Black Carbon

Transversalmente, se observa que las emisiones de BC tienden a disminuir a medida que aumenta la proporción de biocombustible en la mezcla. Esta tendencia es consistente en todos los biocombustibles evaluados. El biocombustible de Fritura es el más efectivo en la reducción de las emisiones de BC en todas las proporciones de mezcla, seguido por el de Grasa animal y el aceite de Palma. El biocombustible de aceite de Soya también muestra una significativa reducción de BC en la mezcla B5.

Las reducciones promedio de emisiones de BC en comparación con el diésel puro (B0) varían según el biocombustible y la proporción de mezcla. La mayor disminución porcentual se observa en las comparaciones B0-B5 para los biocombustibles de Fritura y Soya. Para la Grasa animal, hay una reducción progresiva de emisiones, alcanzando un 99% en B0-B80, con un alto factor de correlación de 0.91. El aceite de Palma también muestra una reducción progresiva en las emisiones, alcanzando un 76% en B0-B80, con un factor de correlación de 0.90.

4.3 Recomendaciones

Recomendación MP granulometría

Se recomienda completar las mezclas faltantes para tener una visión holística y una mirada más clara de la tendencia en todos los biocombustibles.

Continuar evaluando las reducciones de MP en diferentes tamaños de partículas (MP10, MP2.5, MP1) para comprender mejor cómo los biocombustibles afectan las emisiones en diferentes condiciones y ajustar las estrategias de mezcla en consecuencia.

Recomendación MP gravimetría

Para mezclas con bajas concentraciones de biocombustible, el aceite de fritura parece ser la opción más eficiente.

En aplicaciones donde se puede utilizar una mayor proporción de biocombustible, el aceite de palma muestra una gran eficiencia en la reducción de emisiones de PM2.5.

Es importante considerar las variaciones en eficiencia al diseñar mezclas de combustibles para diferentes aplicaciones y objetivos de reducción de emisiones.

Recomendación BC granulometría

Fomentar el uso de biocombustibles, especialmente el de Fritura y Grasa animal, que han demostrado ser altamente efectivos en la reducción de emisiones de BC para mezclas con poco porcentaje de biocombustible.

Considerar la implementación de mezclas con mayores proporciones de biocombustible (B20 y B80) para maximizar la reducción de emisiones de BC y mejorar la calidad del aire.

Establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar las emisiones de BC y otros contaminantes, permitiendo ajustar las mezclas de biocombustibles para lograr mejores resultados.

Invertir en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia de los biocombustibles y explorar nuevas fuentes de biocombustibles que puedan ser aún más efectivas en la reducción de emisiones.

Desarrollar políticas y regulaciones que incentiven el uso de biocombustibles y establezcan estándares claros para las mezclas de combustibles, garantizando la reducción de emisiones de BC a nivel nacional.

5 Bibliografía

- [1] AyT Group, Available: <http://www.ayt.cl/es/>
- [2] Alley Roberts y Associates, Inc. Manual de control de la calidad del aire. Tomo 1. Mc Graw Hill. México, D. F. 2000, cap. 19.
- [3] Andreae M.O. (1995) 'Climate effects of changing aerosol levels'. In Future Climates of the World: A Modelling Perspective, Henderson-Sellers A. (editor), Elsevier.
- [4] Boris Taglioni, análisis de consumo de combustible y eficiencia energética mediante la utilización de biodiesel de distintos orígenes en vehículos comerciales.
- [5] Camilo Sebastián Medina Pizarro, Estudio experimental del uso de mezclas diésel-biodiesel en quemador de petróleo, 2014.
- [6] CAPALDO, K., PANDIS, S. Lifetimes of Ultrafine Diesel Aerosol., Final Report E 43, Department of Chemical Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, December 1 (2001).
- [7] Comunidad Económica Europea, «relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de medidas contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor,» 2007.
- [8] Conicyt. Análisis y generación de base de datos de potencial energético y emisiones contaminantes de biocombustibles de interés nacional [En línea]: <http://www.conicyt.cl/wp-content/themes/fondef/encuentra_proyectos/PROYECTO/09/I/D09I1070.html> [consulta: 12 noviembre 2014].
- [9] De Nevers Noel. Ingeniería de control de la contaminación del aire. Mc Graw Hill. México, D. F. 1998, pág. 183.
- [10] Dec J.E. (1997) 'A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging'. Society of Automotive Engineers 970873.
- [11] Dec J.E., Kelly-Zion P.L. (2000) 'The effects of injection timing and diluent addition on late combustion soot burn-out in a DI diesel engine based on simultaneous 2-D imaging of OH and soot'. Society of Automotive Engineers 2000-01-0238.
- [12] EASTWOOD, Peter. Particulate Emissions from Vehicles. John Wiley and Sons, 2008.
- [13] Flagan R.C., Seinfeld J.H. (1988) Fundamentals of Air Pollution Engineering. Prentice Hall.
- [14] GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 2014. [En línea]. Available: <http://www.grimm-aerosol.com/en/solutions/nano-particle-monitoring.html>.
- [15] HEYWOOD, J. B. (1988). Internal combustion engine fundamentals. New York, McGraw-Hill.
- [16] Hoard, J., Bretz, R., and Ehara, Y., (2003), "Diesel Exhaust Simulator: Design and Application to Plasma Discharge Testing," SAE Technical Paper 2003-01-1184.
- [17] Jorge Sepulveda, Estudio de emisiones generadas en procesos de combustión de biodiesel de distinto origen para uso con vehículos comerciales.
- [18] Li X., Wallace J.S. (1995) 'A phenomenological model for soot formation and oxidation in direct injection diesel engines'. Society of Automotive Engineers 952428.
- [19] Magee Scientific Company, 2005
- [20] Mitsubishi Motors Corporation, Workshop Manual L200.
- [21] Myers, J., (1983) "Timed Sampling in the Exhaust of a Direct-Injection Diesel Engine," SAE Technical Paper 831710.
- [22] TOPAS, «Technologie-orientierte Partikel-, Analysen- und Sensortechnik,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.topas-gmbh.de/>.
- [23] J. Rodríguez, Lapuerta, Regeneration of diesel particulate filters: Effect of renewable fuels.

6 Anexo

6.1 Anexo A – Especificaciones técnicas.

A continuación, se presentan las características técnicas y especificaciones mecánicas del vehículo a ensayar, el cual fue adquirido por el proyecto FONDEF D90I-1070.

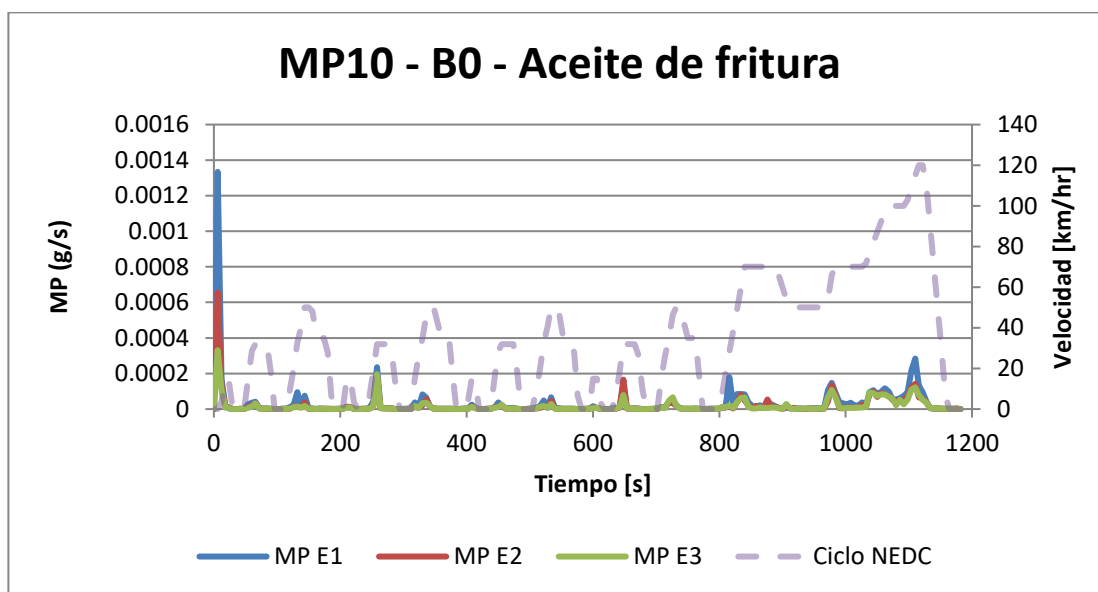
Tabla: Especificaciones técnicas de la camioneta Mitsubishi Katana L200

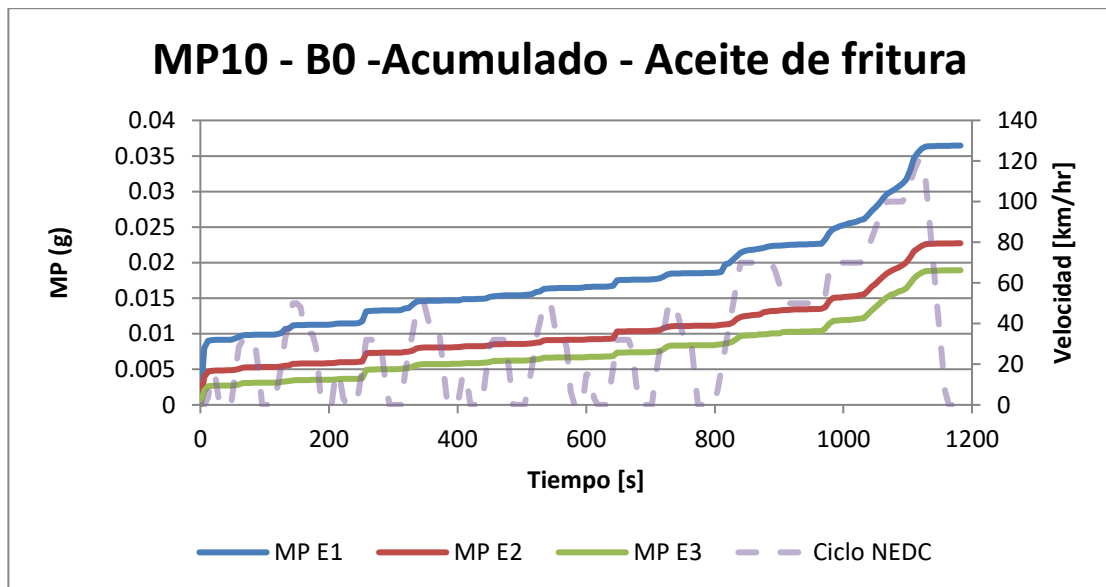
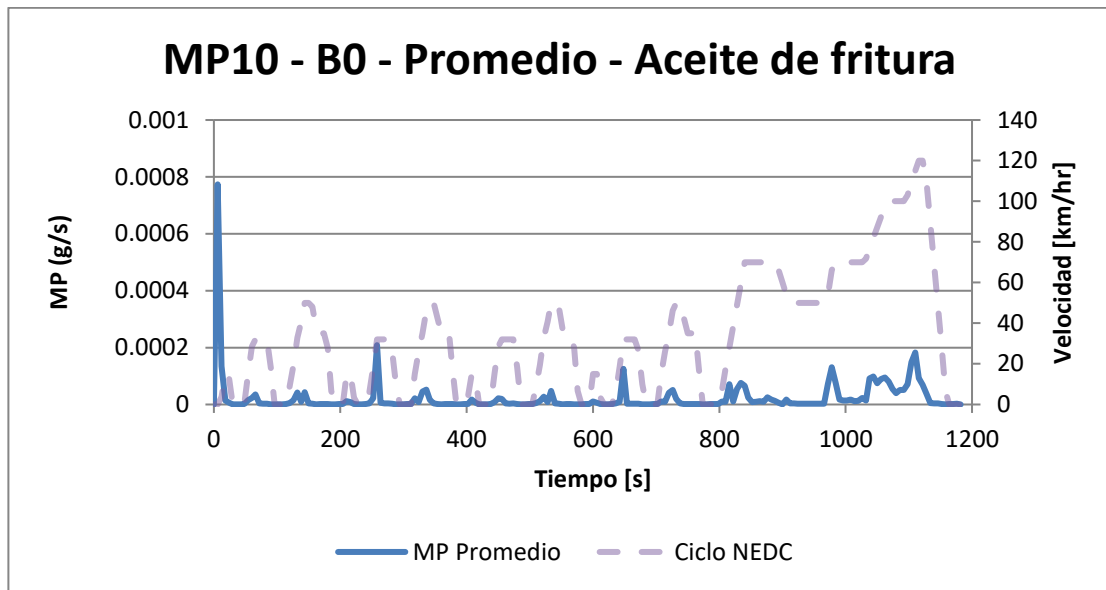
L200 Katana Versión CRM	
Especificaciones Mecánicas	
Tracción	4x4
Dirección Hidráulica	Si
Motor	2,5 Common Rail TDI
Combustible	Diesel
Potencia (hp/rpm)	142/3500
Torque (Nm/rpm)	314/2000
Transmisión	Mecánica 5 Velocidades.
Dimensiones y Peso	
Distancia Entre Ejes (mm]	3.000
Altura Total (mm)	1.775
Largo Total (mm)	5.000
Ancho Total (mm)	1.750
Peso Bruto Vehicular (kg)	2.850
Capacidad de carga (Kg)	960

6.2 Anexo B – Resultados transiente MP para distintas granulometrías.

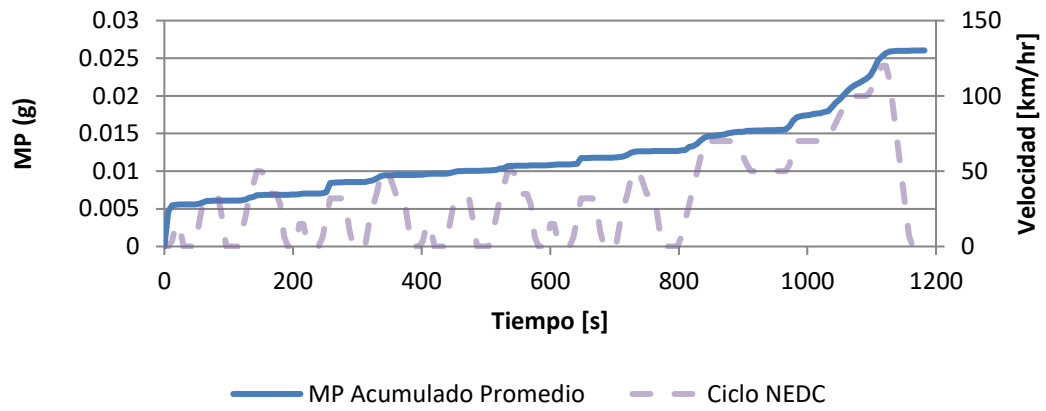
Resultados para MP en sus combustibles de distintos orígenes.

6.2.1 Aceite de fritura, granulometría de 10 μm para distintas mezclas.

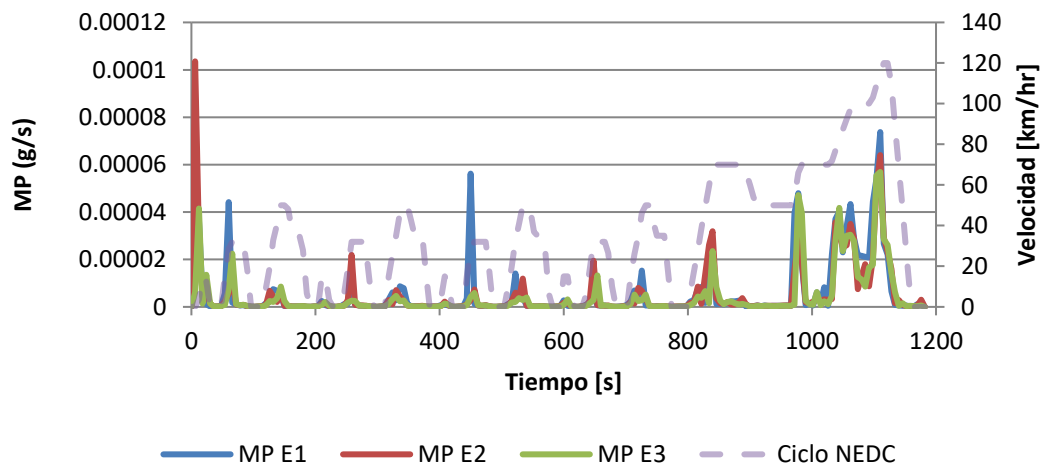




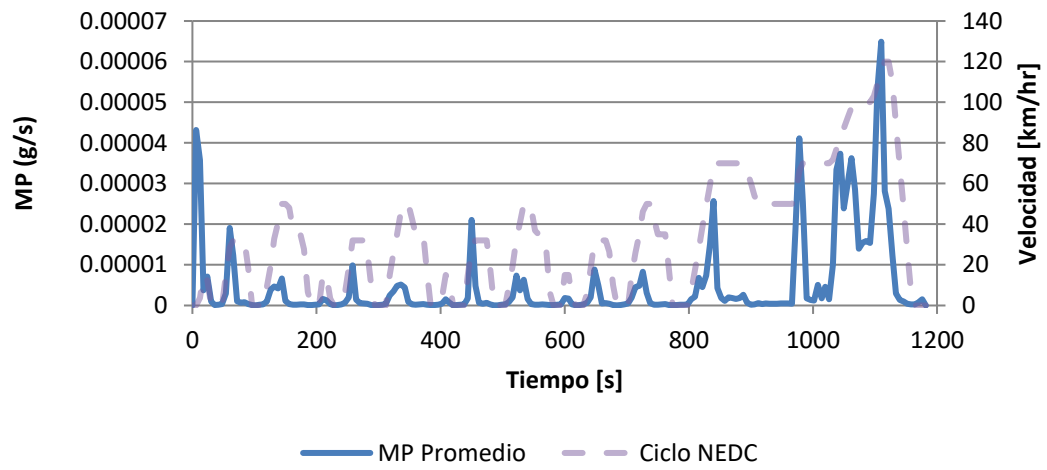
MP10 - B0 - Acumulado Promedio - Aceite de fritura



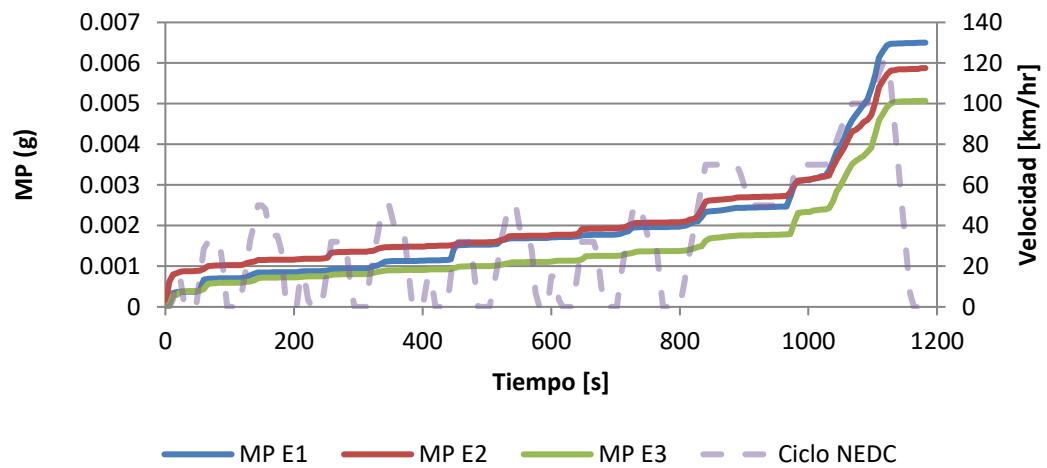
MP10 - B5 - Fritura



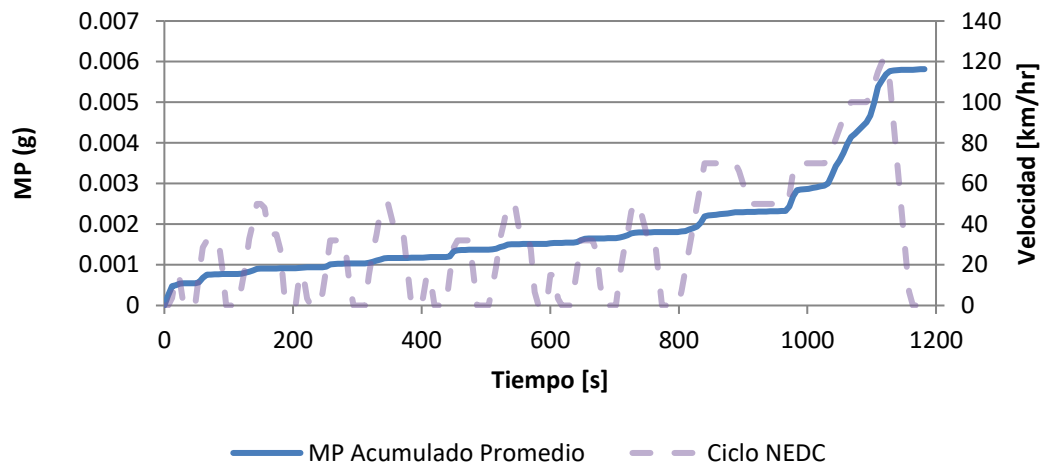
MP10 - B5 - Promedio - Fritura



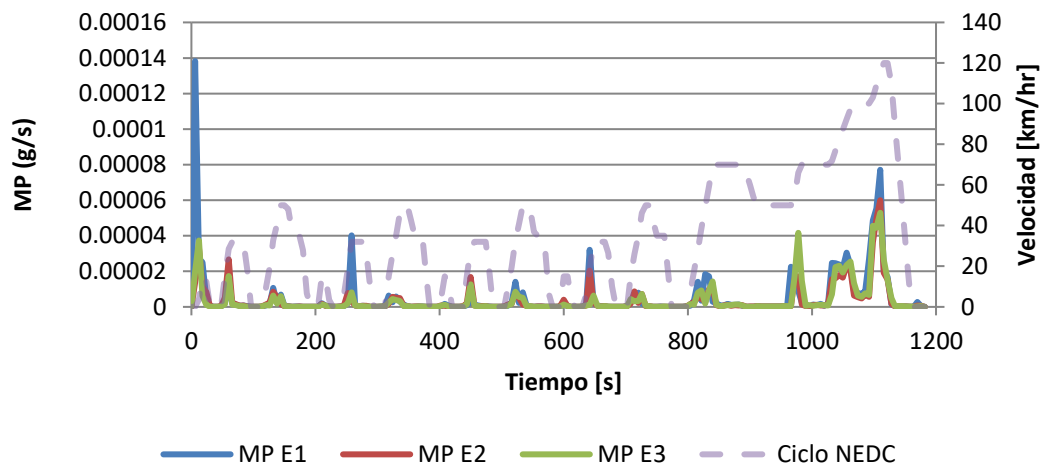
MP10 - B5 -Acumulado - Fritura

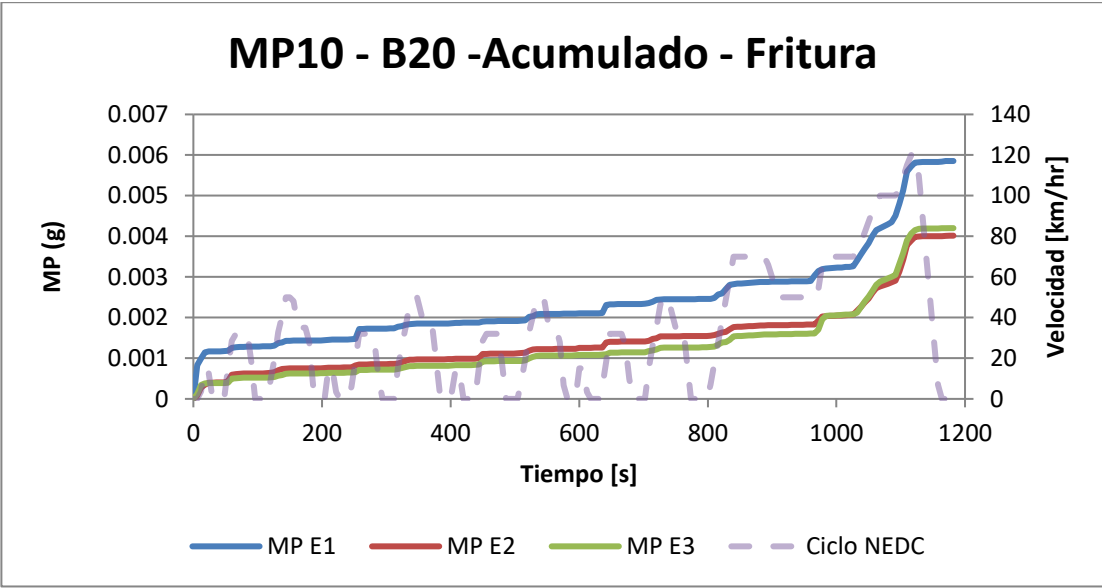
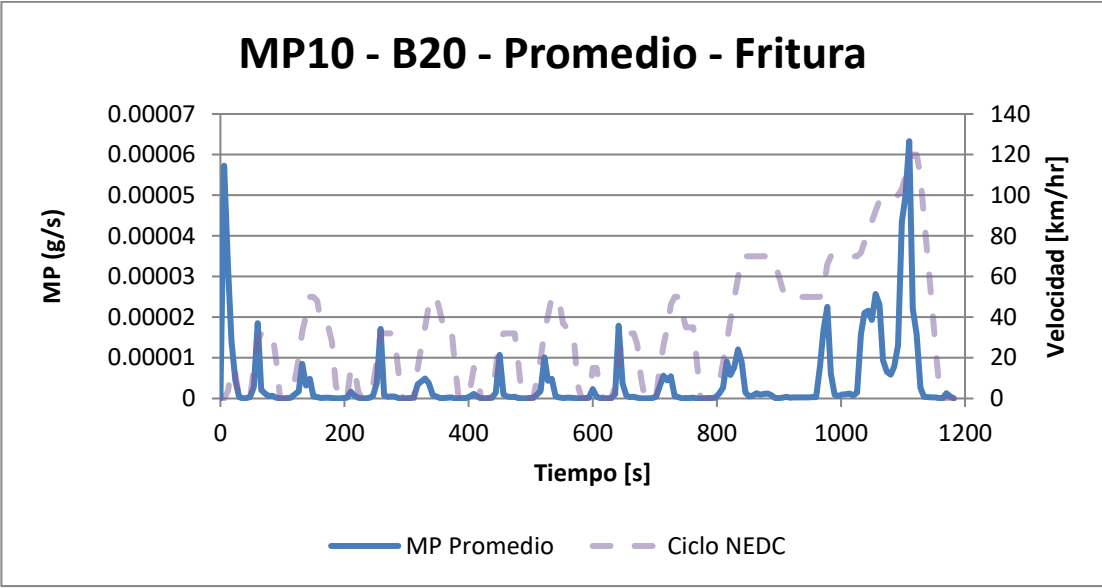


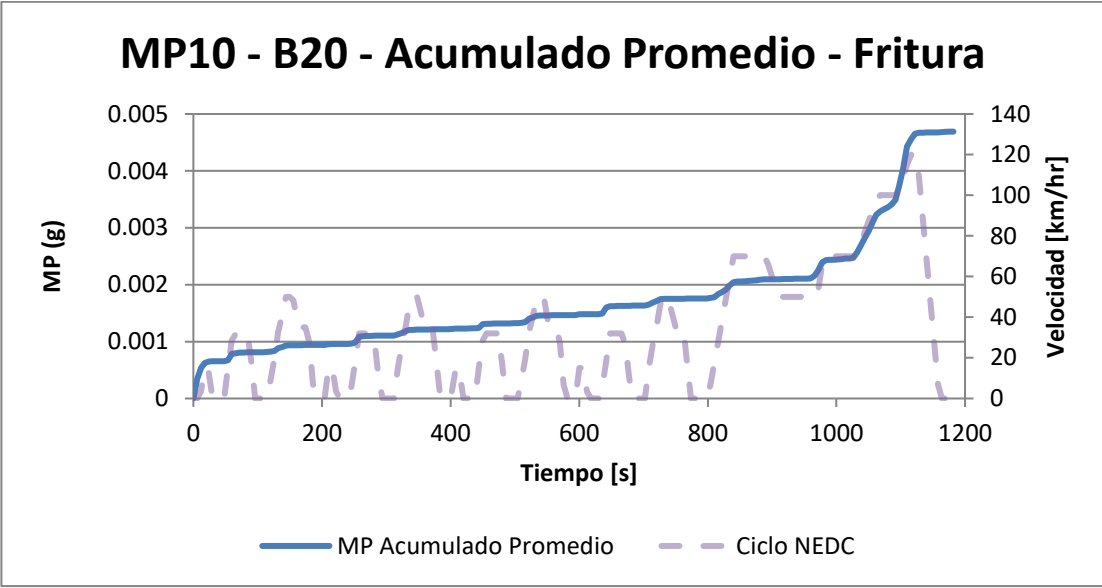
MP10 - B5 - Acumulado Promedio - fritura



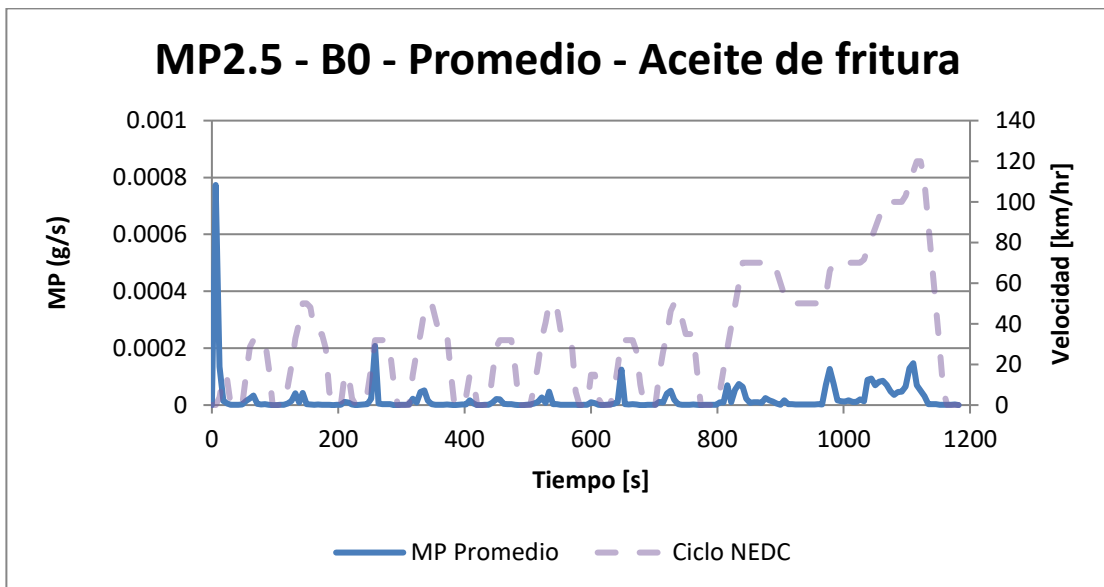
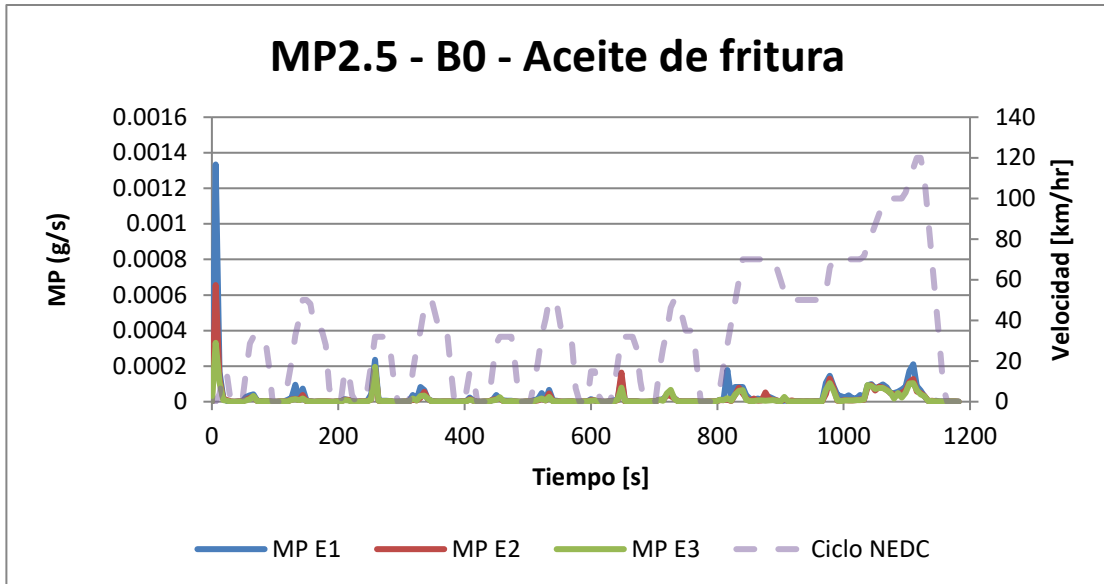
MP10 - B20 - Fritura



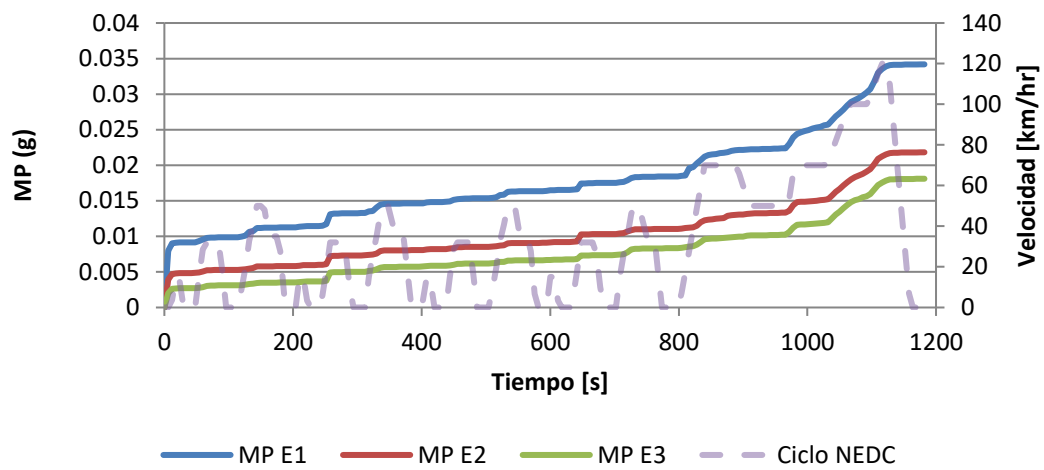




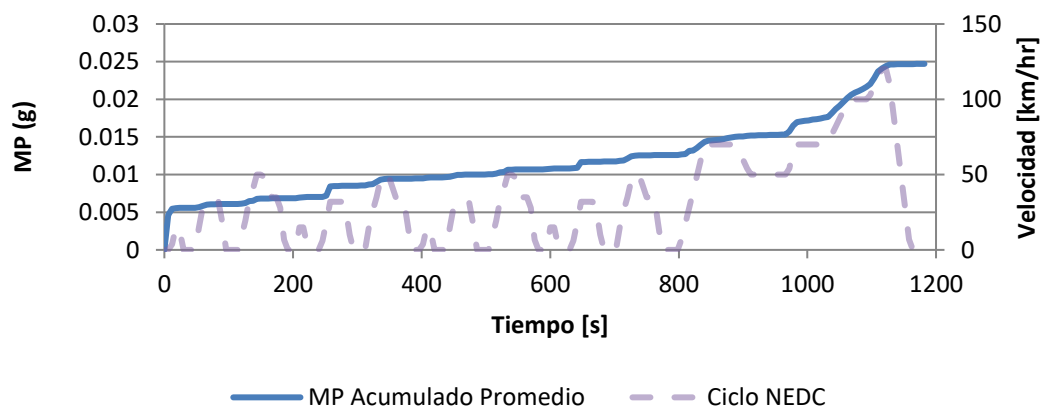
6.2.2 Aceite de fritura, granulometría de 2.5 μm para distintas mezclas.

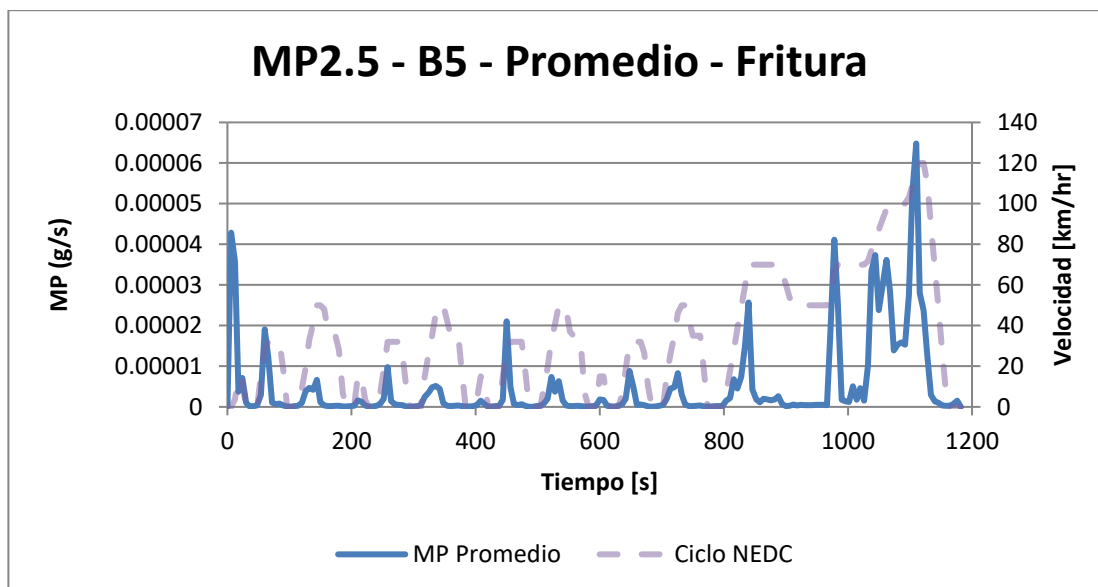
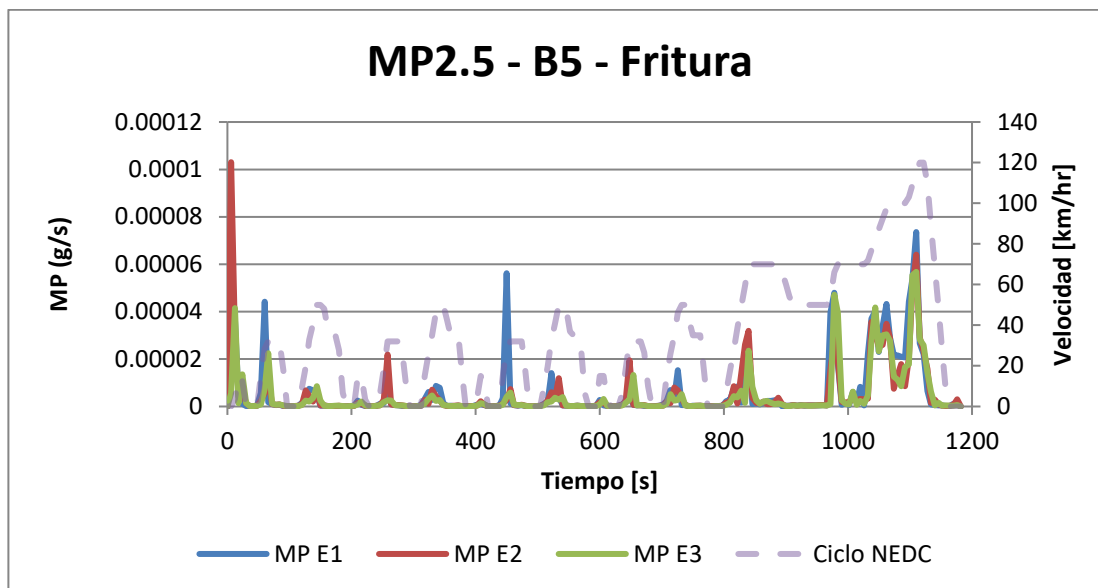


MP2.5 - B0 -Acumulado - Aceite de fritura

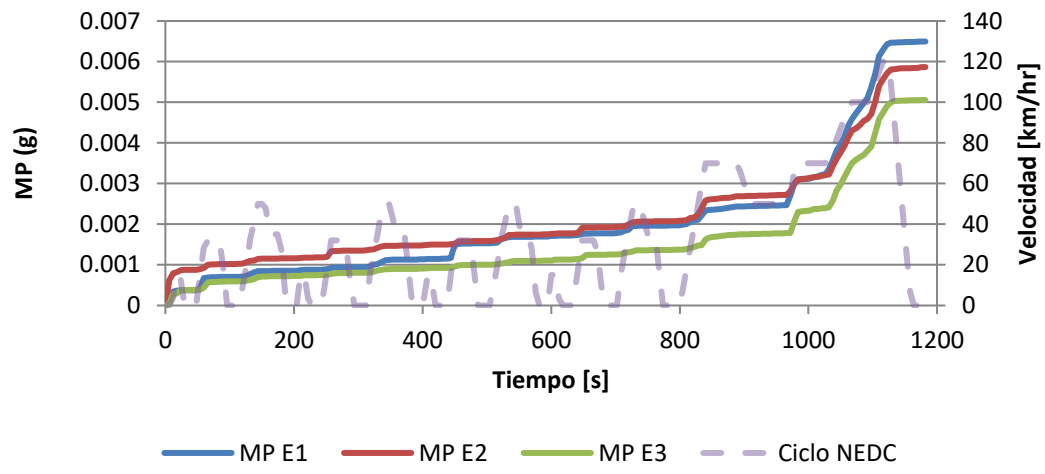


MP2.5 - B0 - Acumulado Promedio - Aceite de fritura

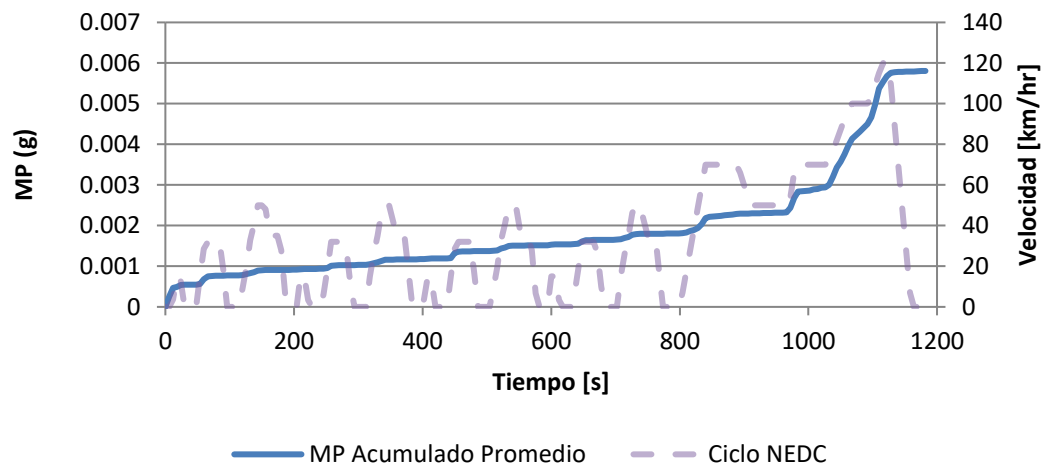




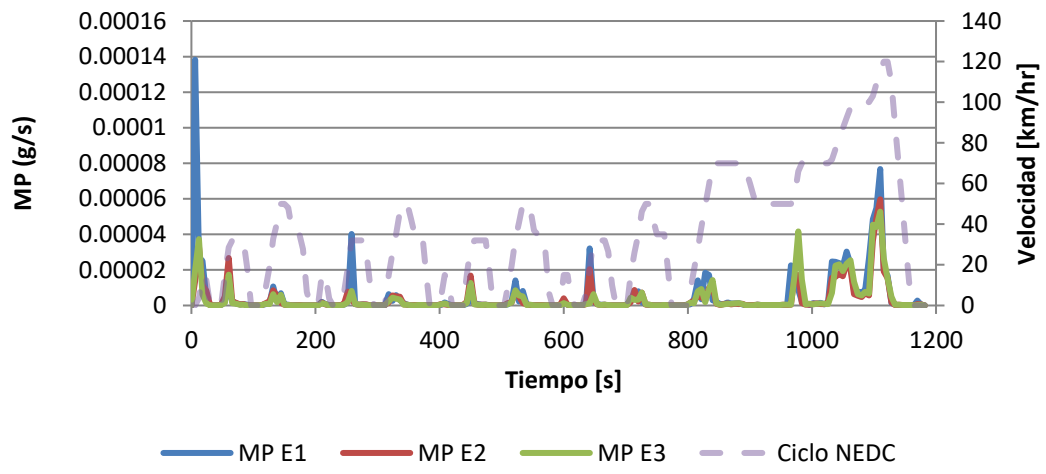
MP2.5 - B5 -Acumulado - Fritura



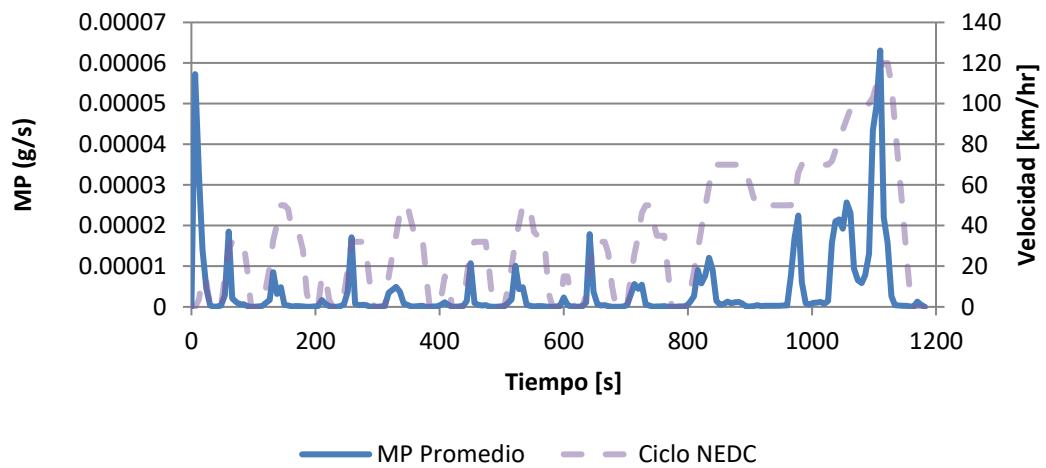
MP2.5 - B5 - Acumulado Promedio - Fritura

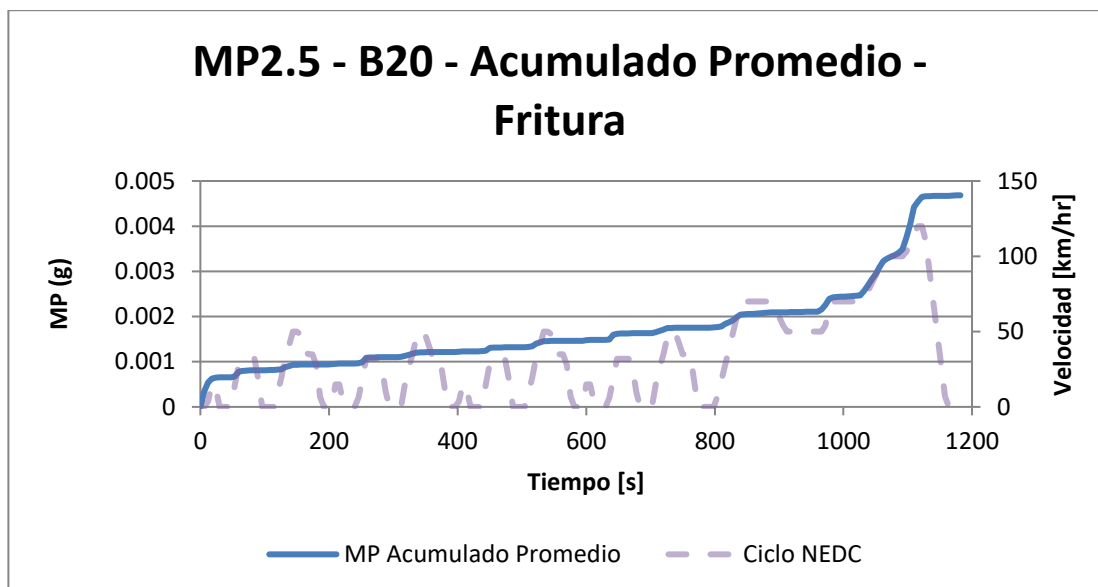
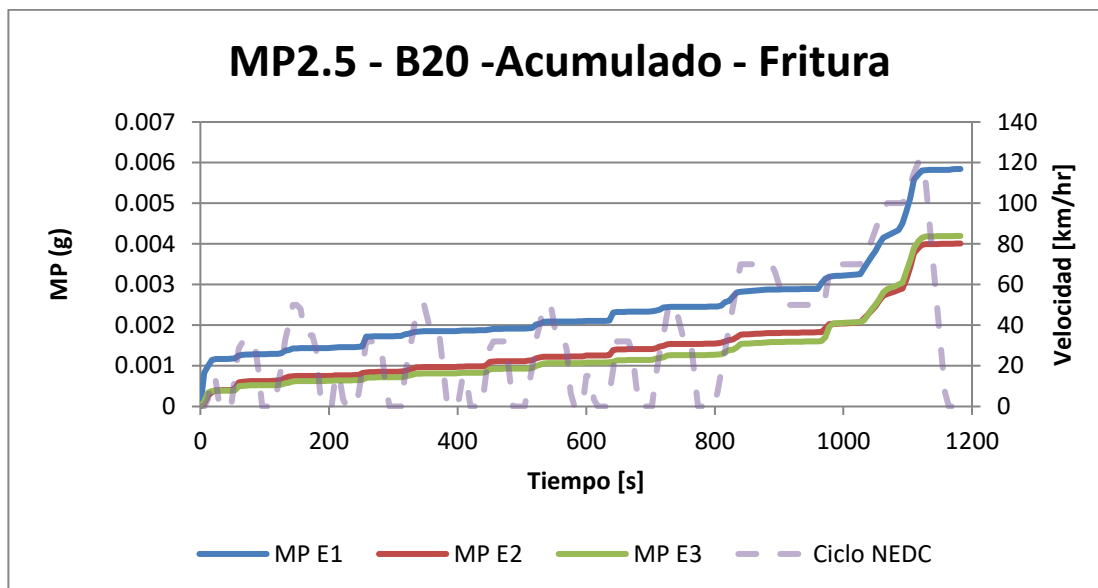


MP2.5 - B20 - Fritura

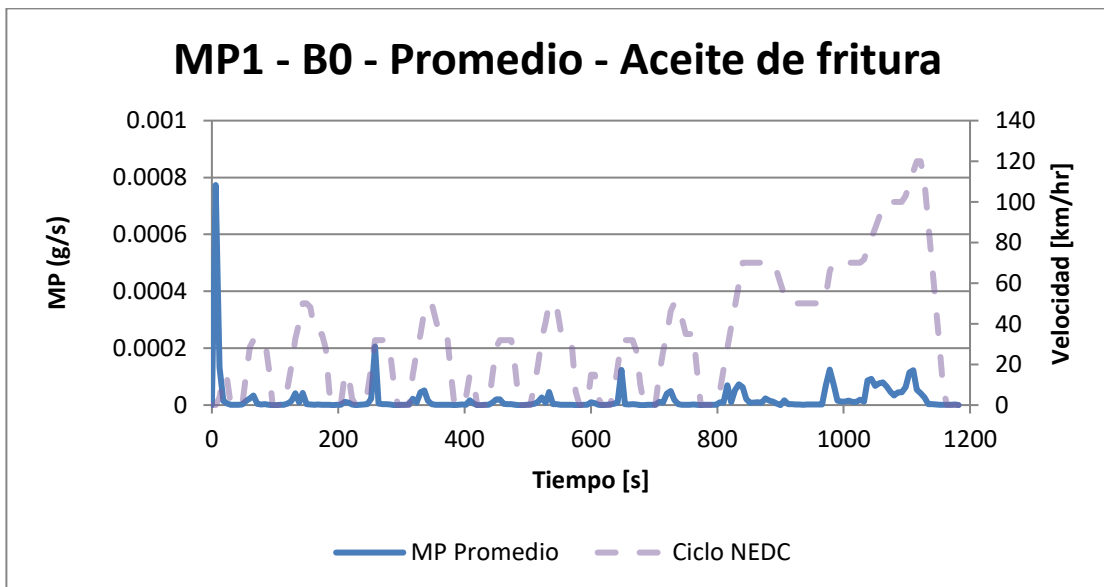
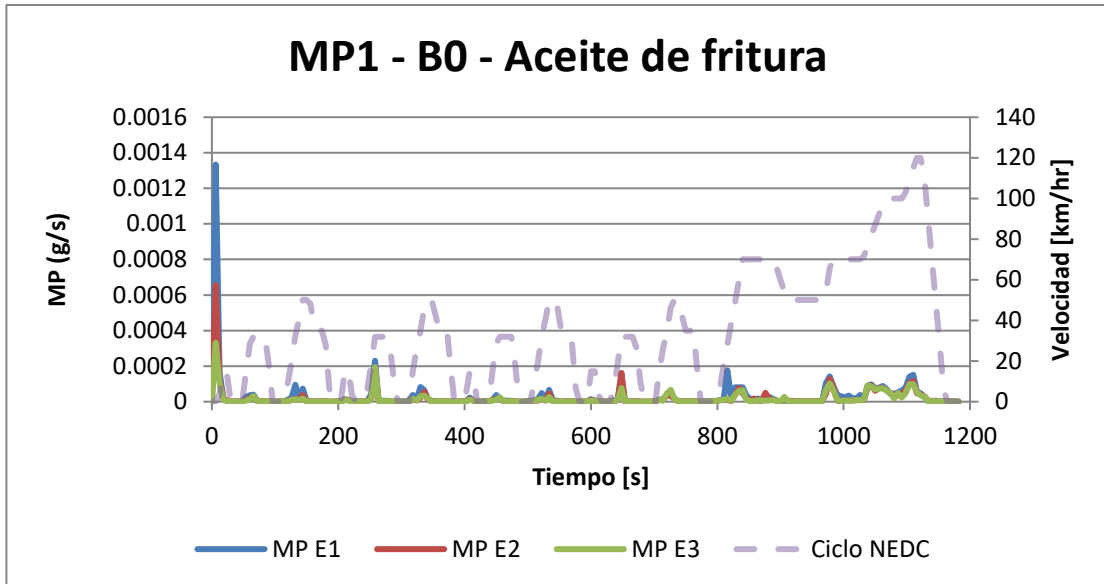


MP2.5 - B20 - Promedio - Fritura

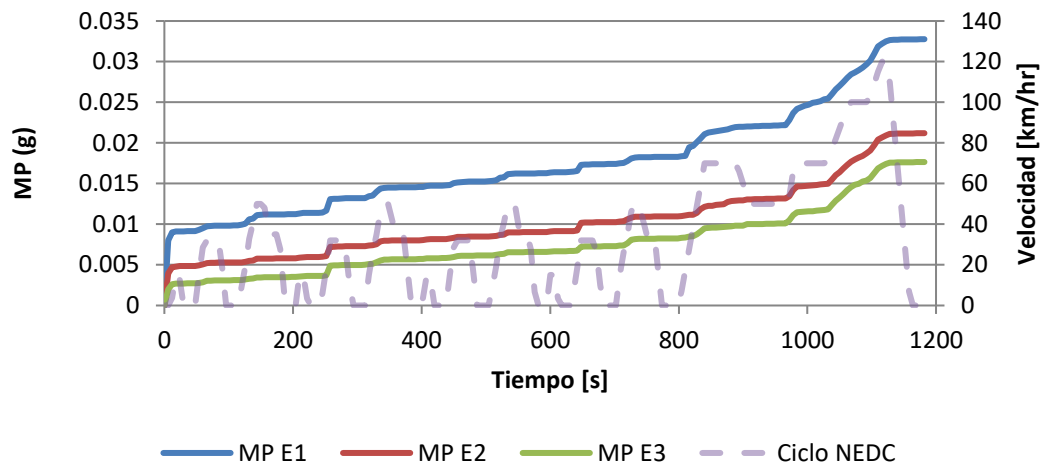




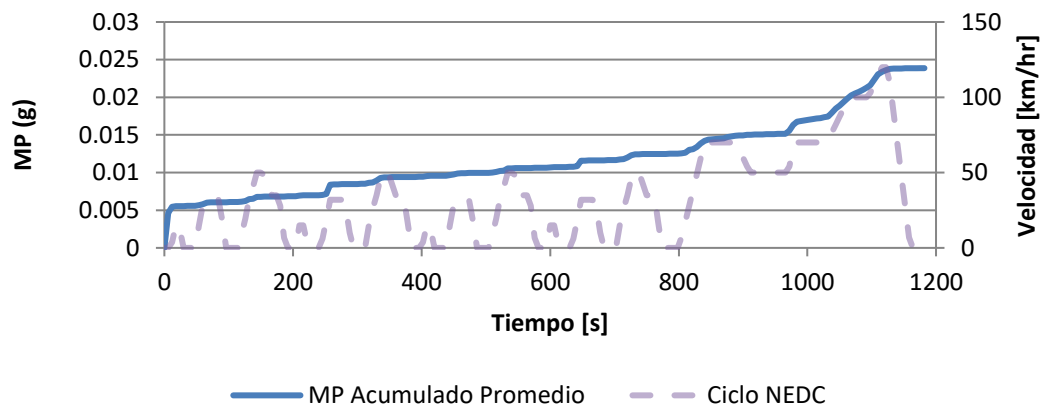
6.2.3 Aceite de fritura, granulometría de 1 μm para distintas mezclas.

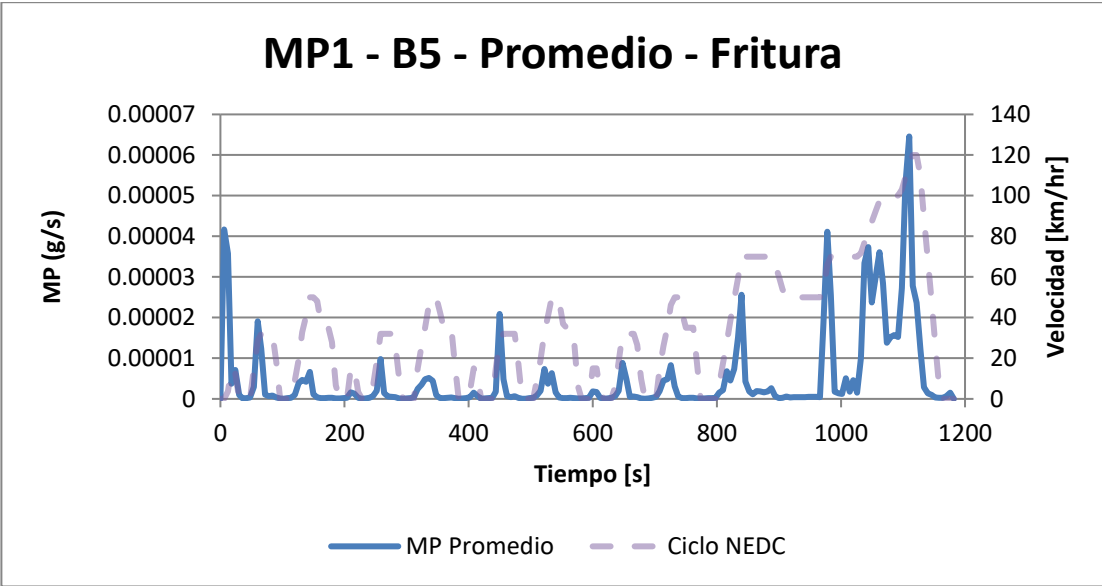
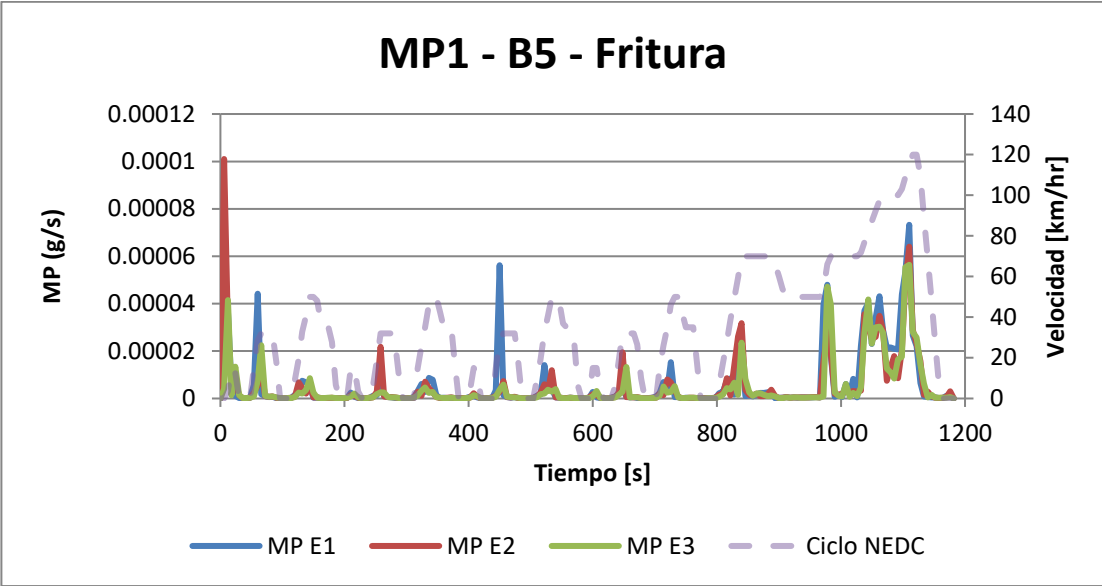


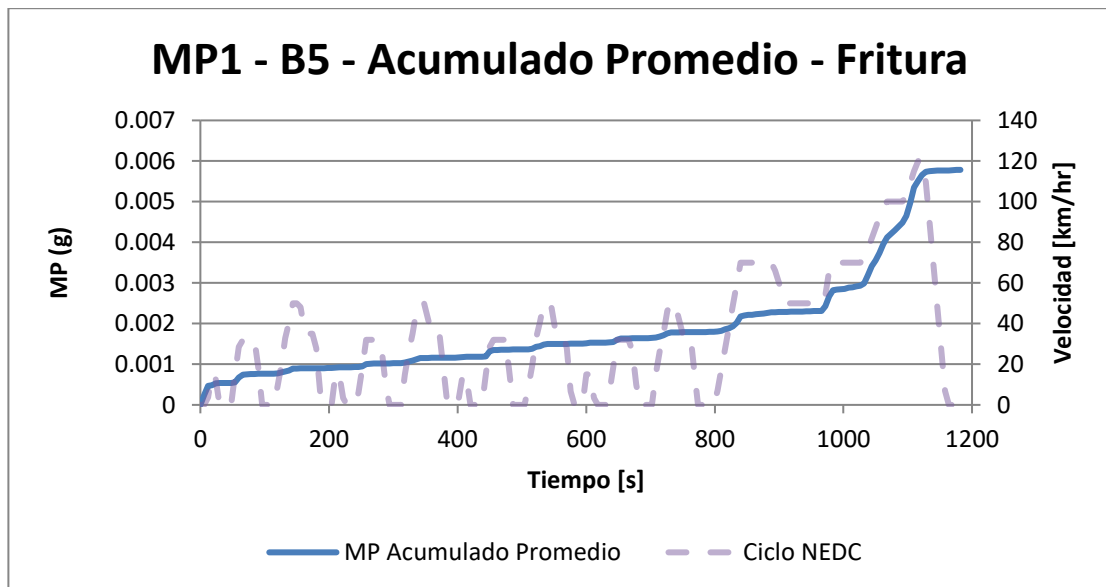
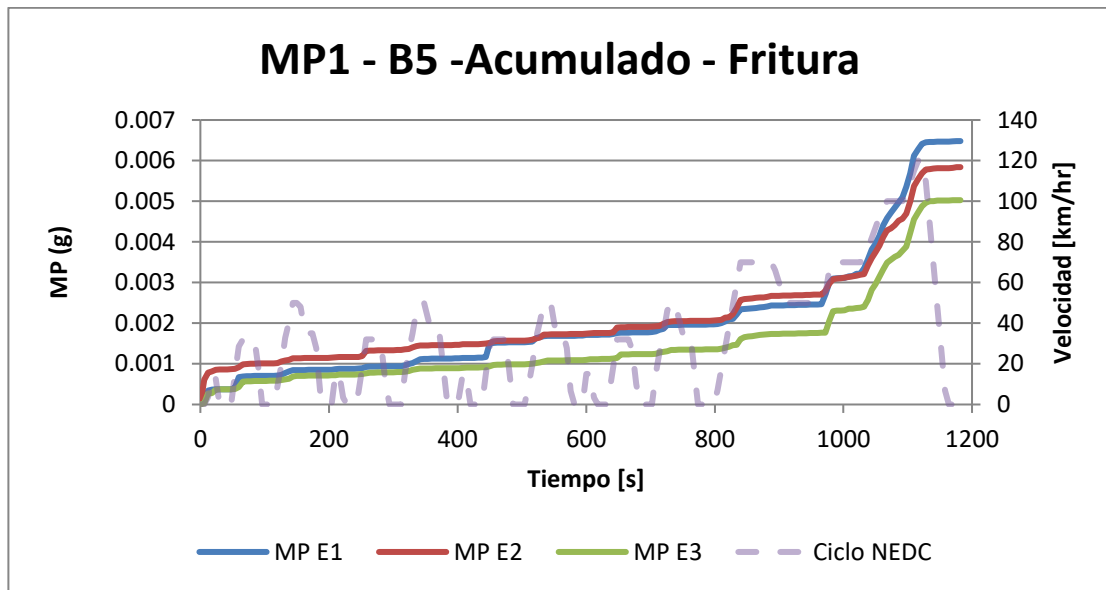
MP1 - B0 -Acumulado - Aceite de fritura

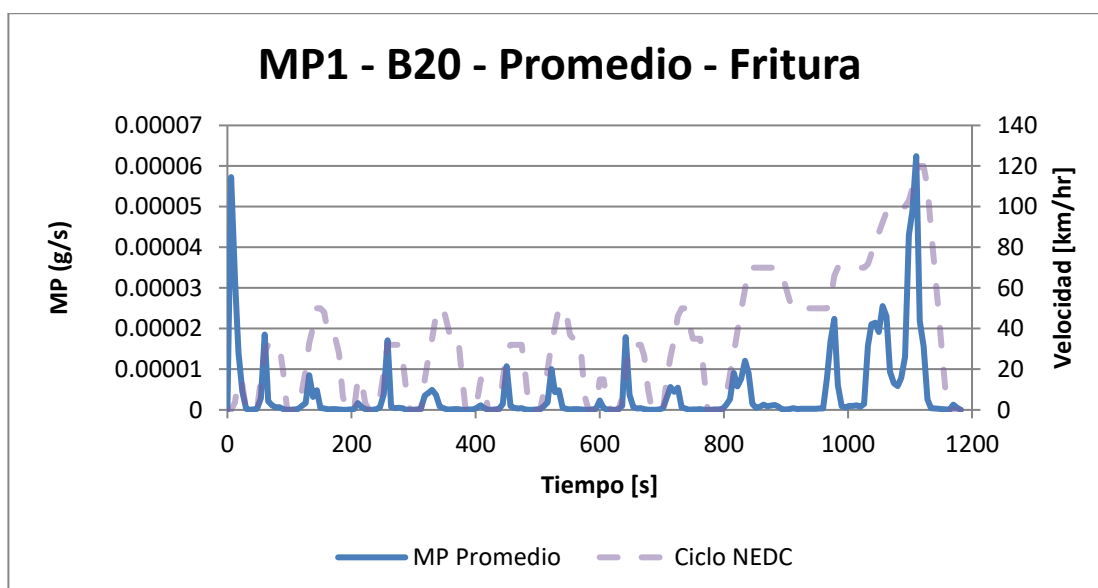
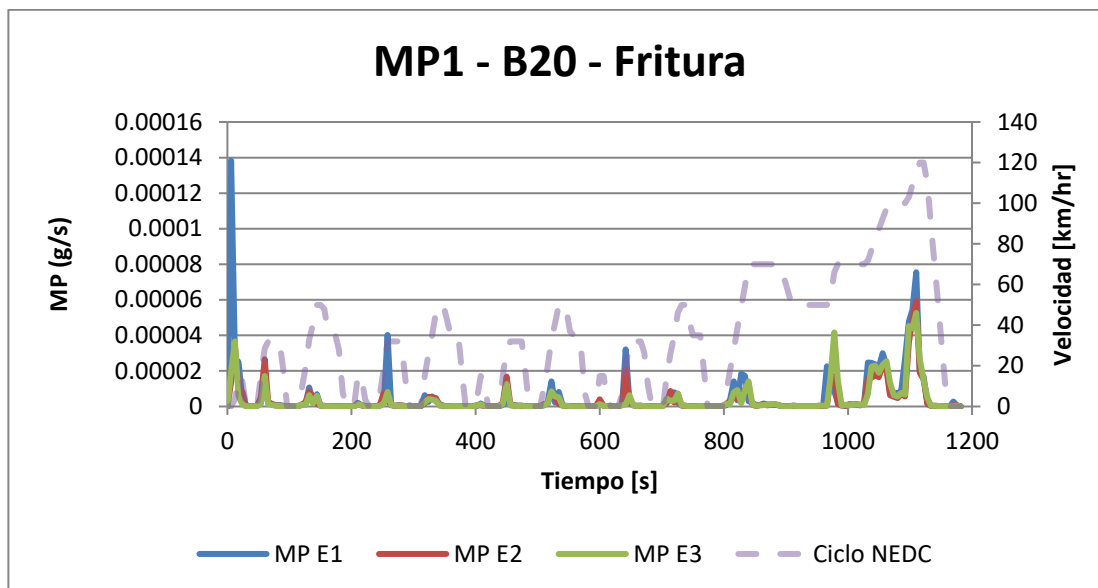


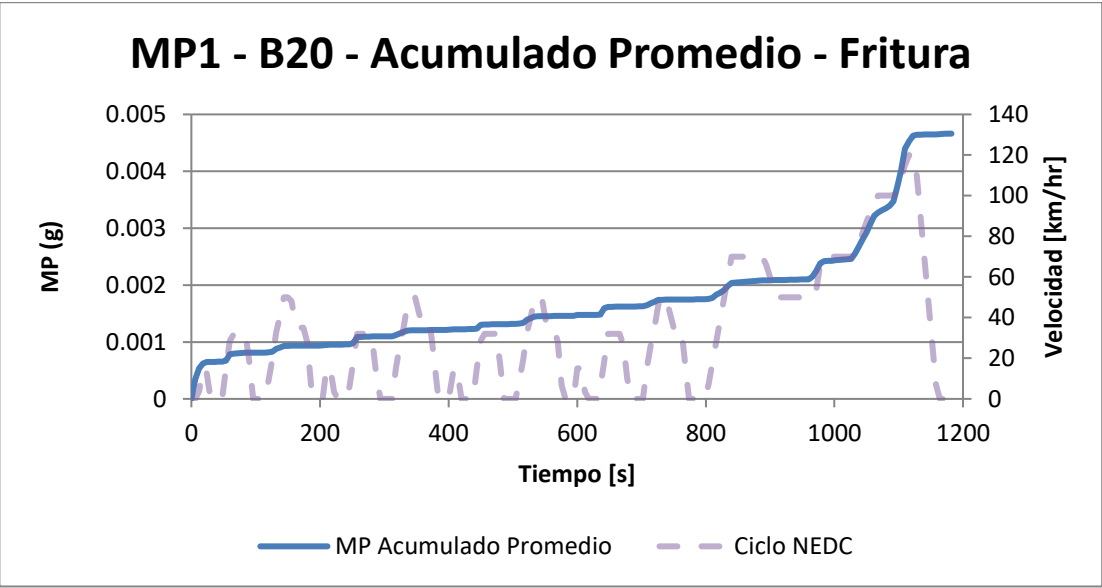
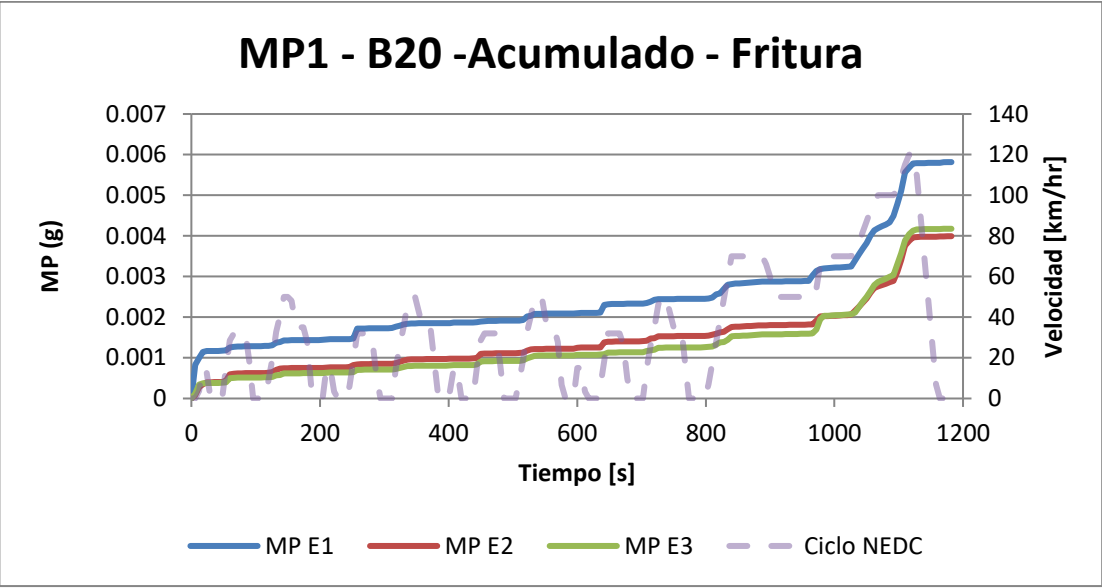
MP1 - B0 - Acumulado Promedio - Aceite de fritura



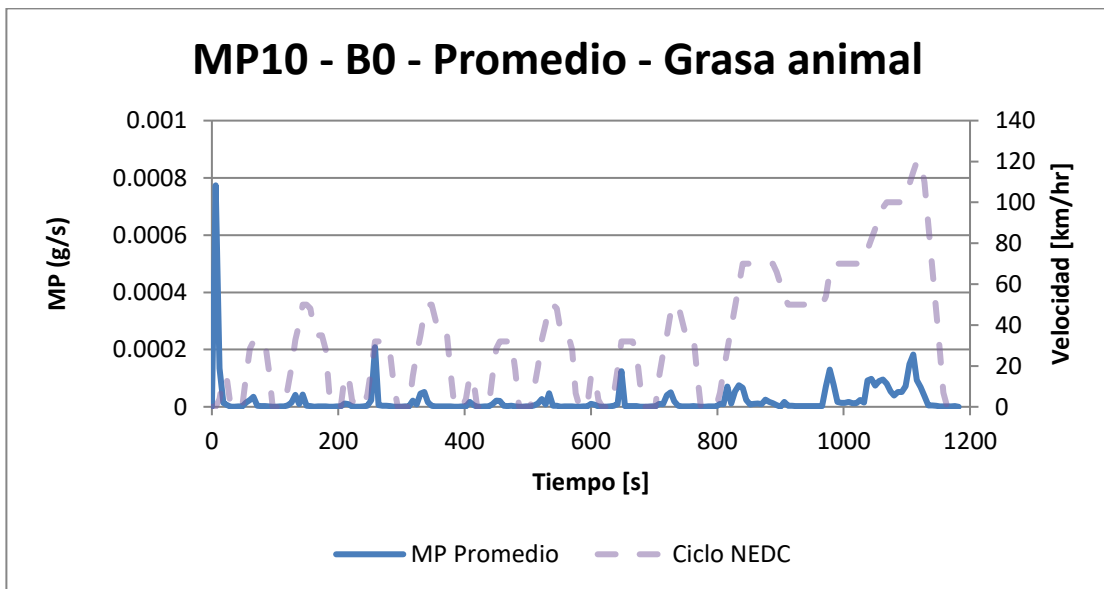
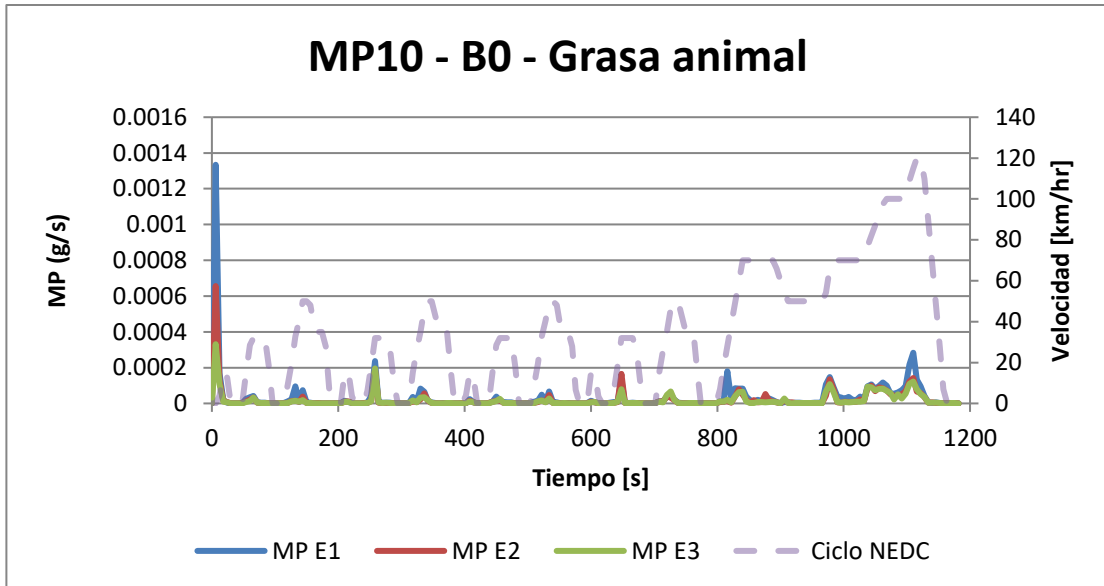


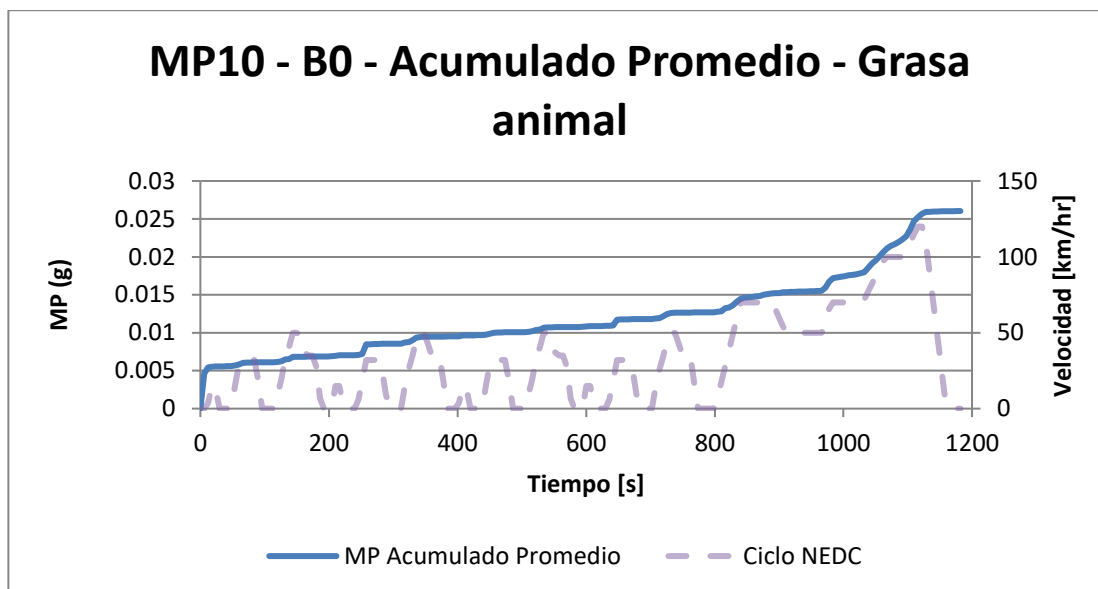
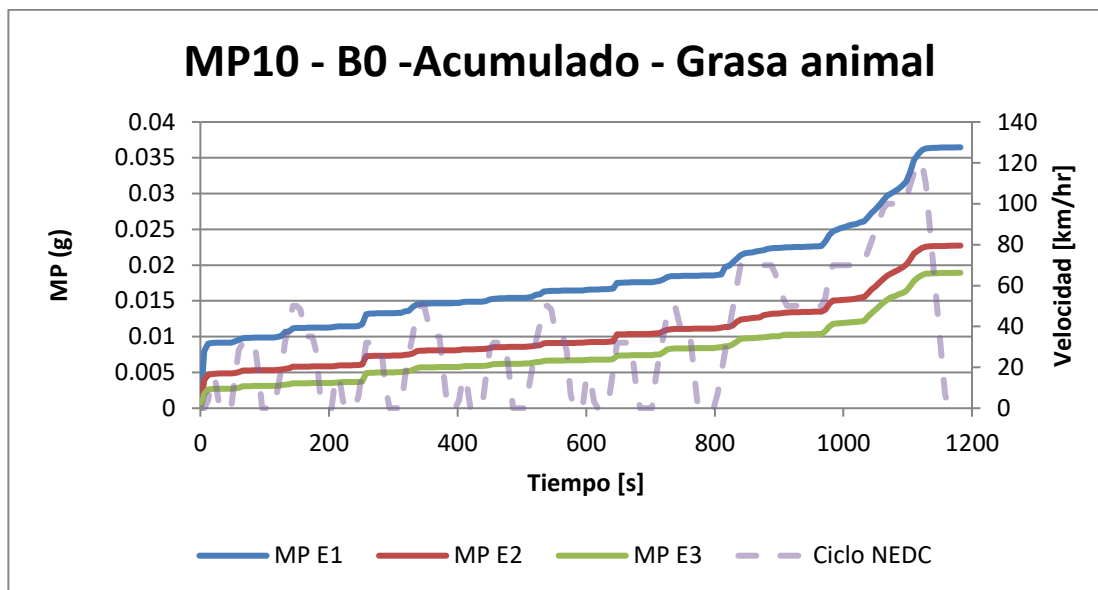




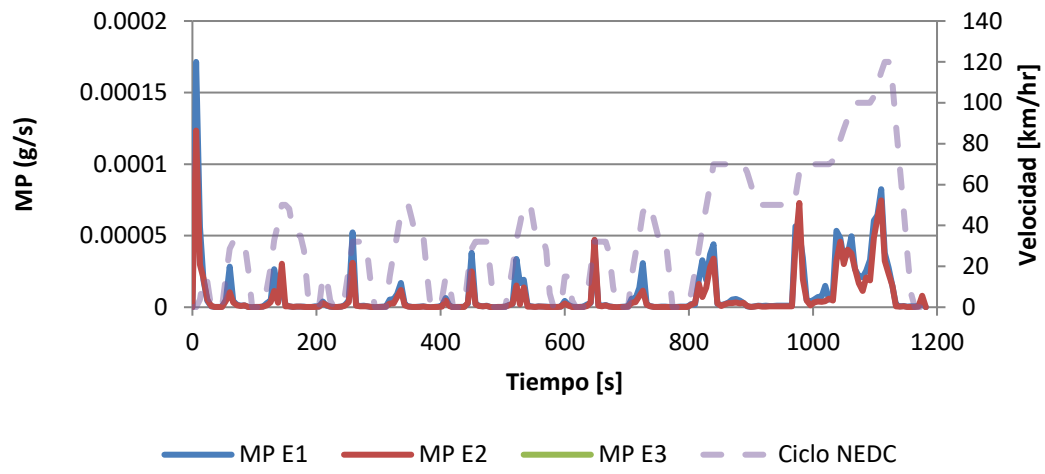


6.2.4 Grasa animal, granulometría de 10 μm para distintas mezclas.

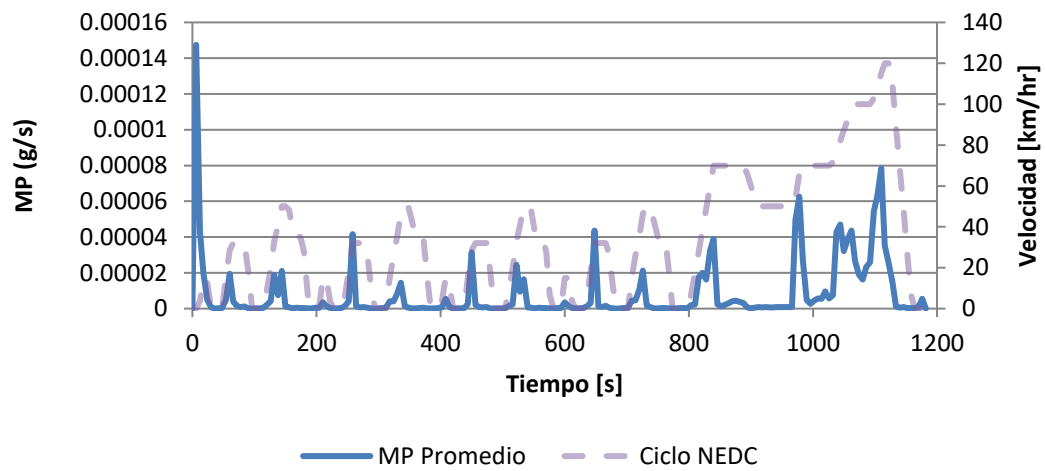


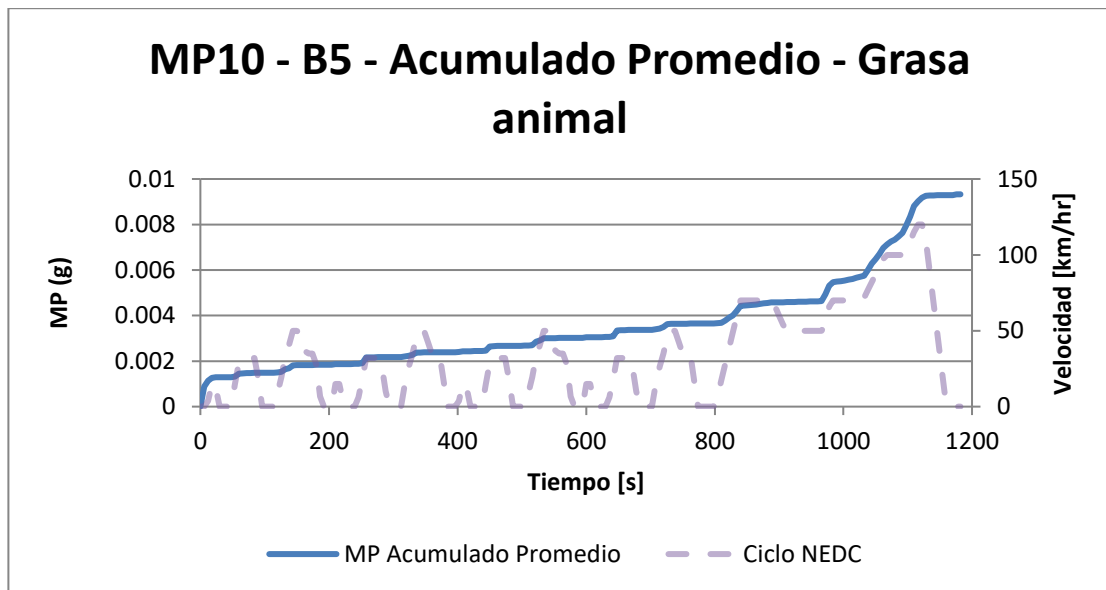
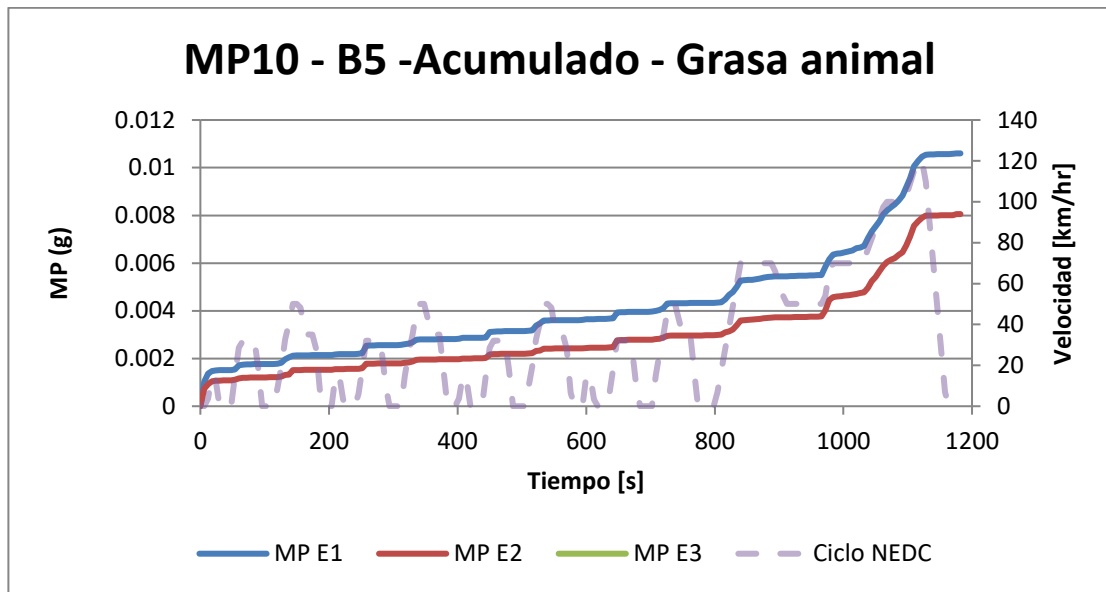


MP10 - B5 - Grasa animal

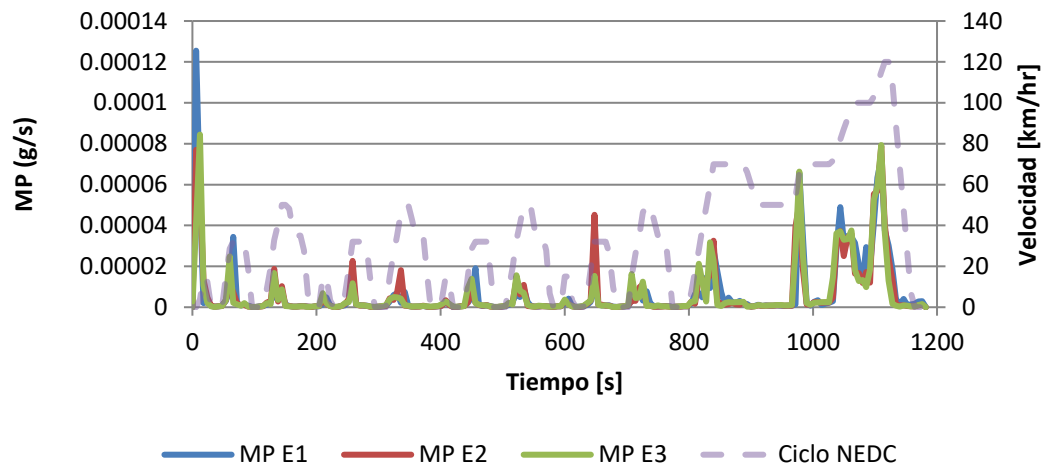


MP10 - B5 - Promedio - Grasa animal

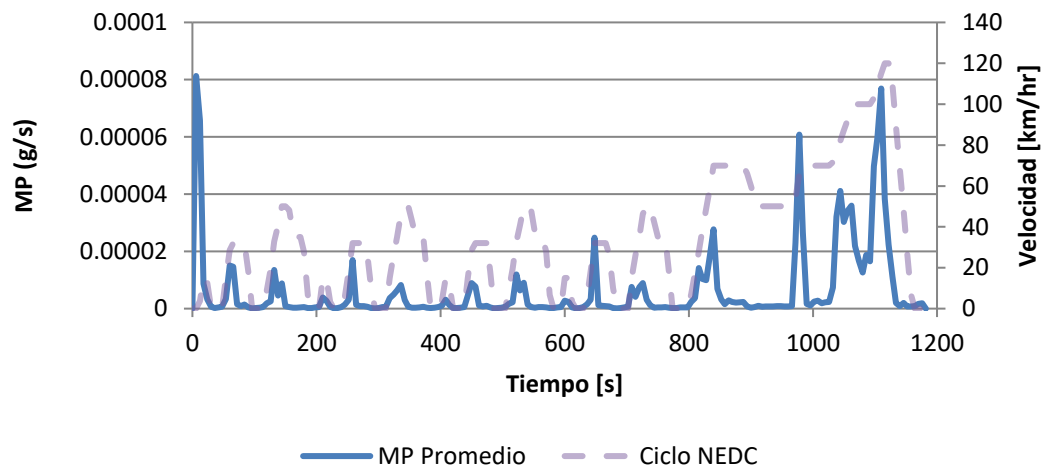




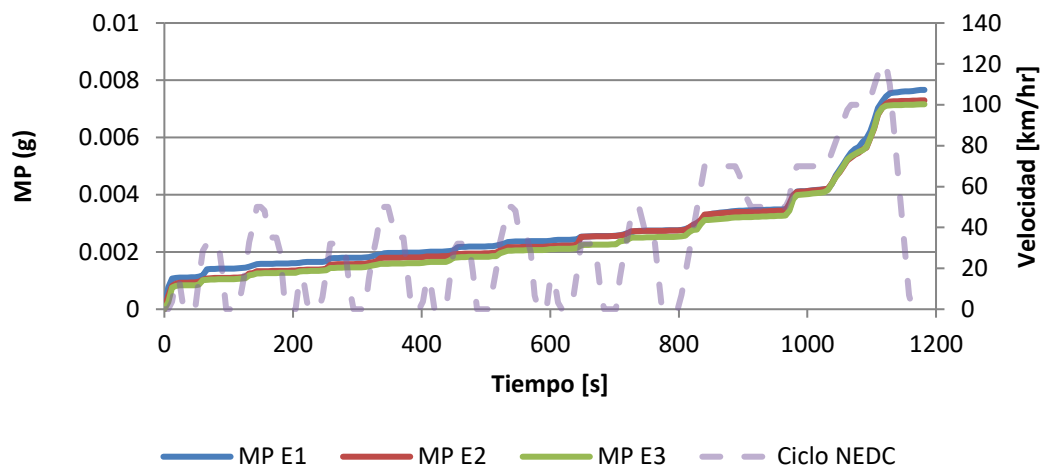
MP10 - B20 - Grasa animal



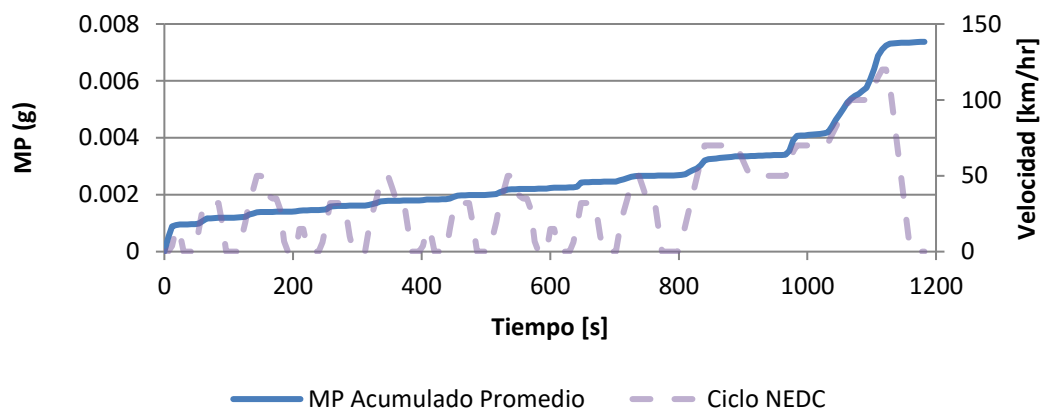
MP10 - B20 - Promedio - Grasa animal



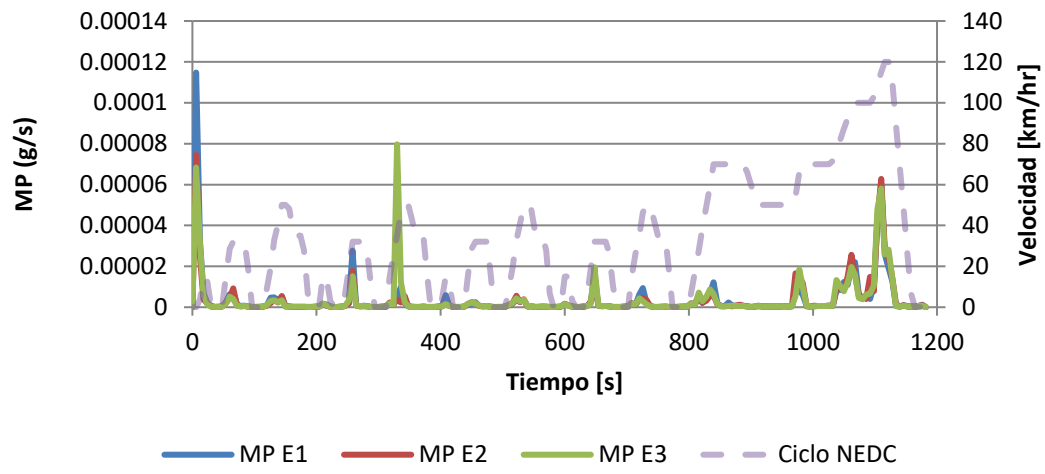
MP10 - B20 -Acumulado - Grasa animal



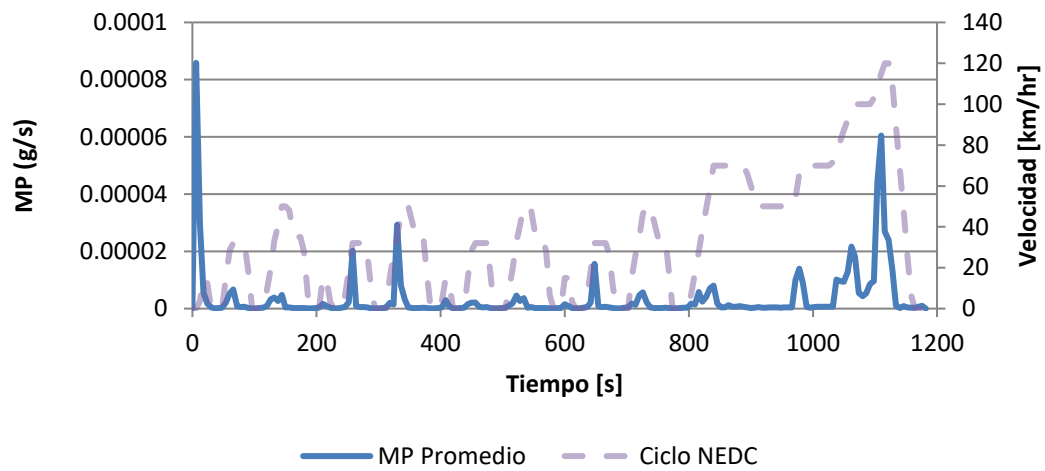
MP10 - B20 - Acumulado Promedio - Grasa animal



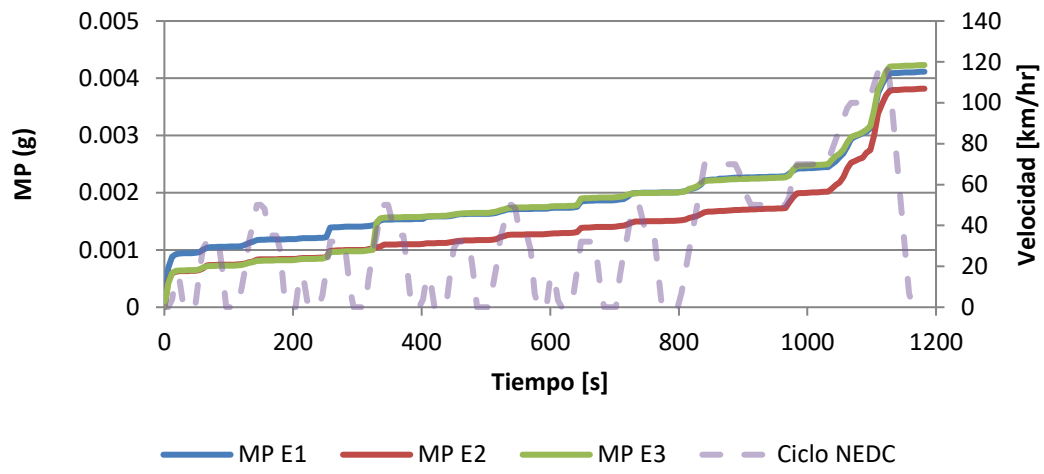
MP10 - B80 - Grasa animal



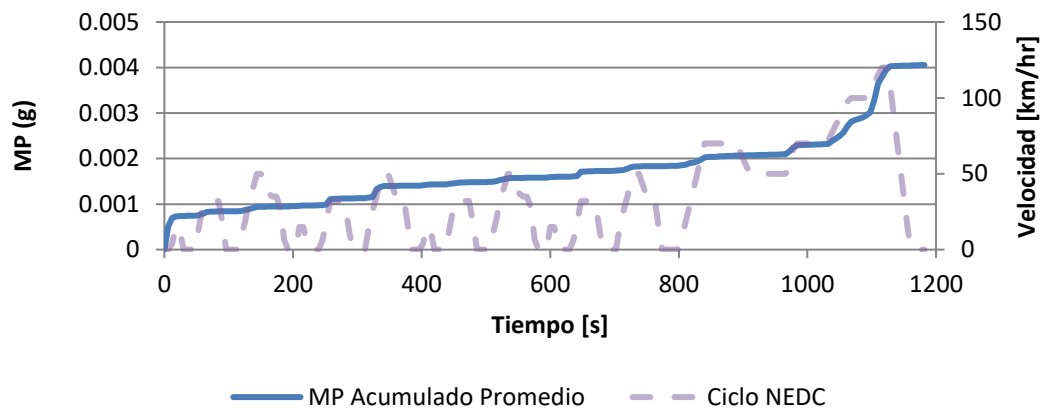
MP10 - B80 - Promedio - Grasa animal



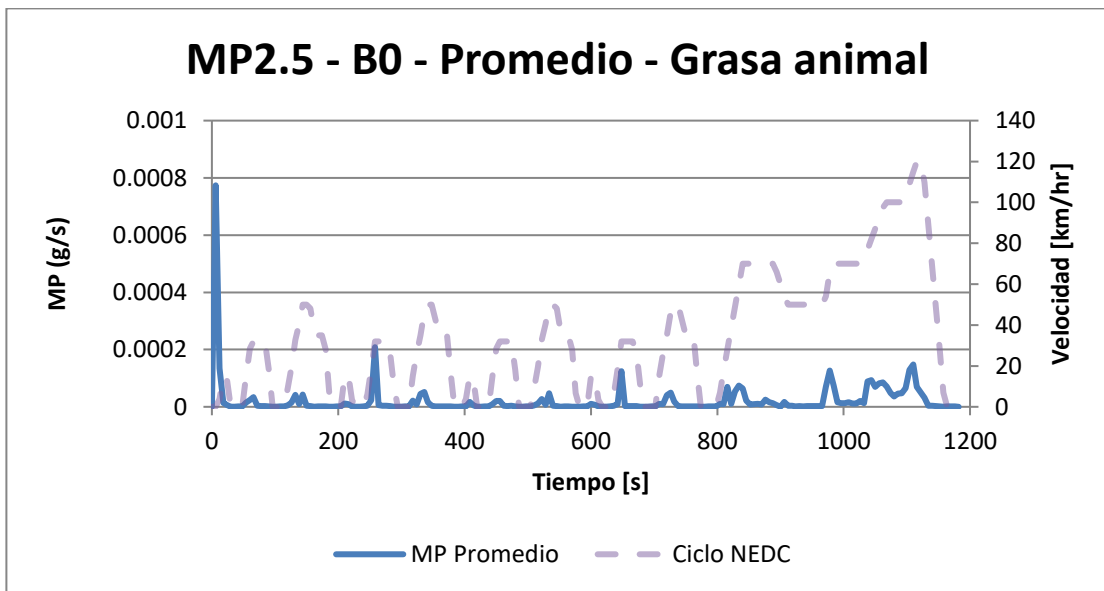
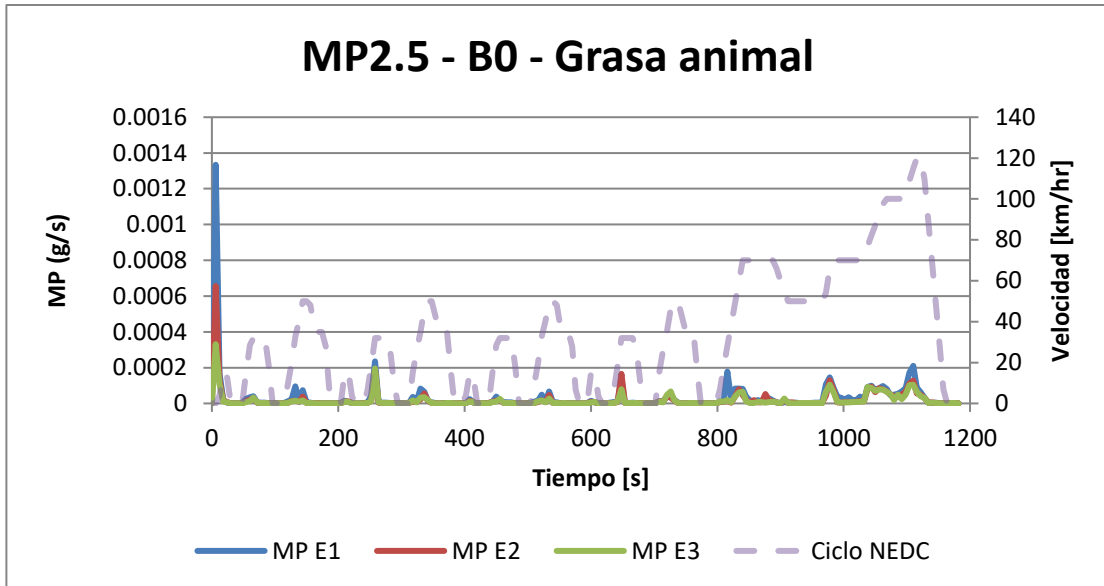
MP10 - B80 -Acumulado - Grasa animal



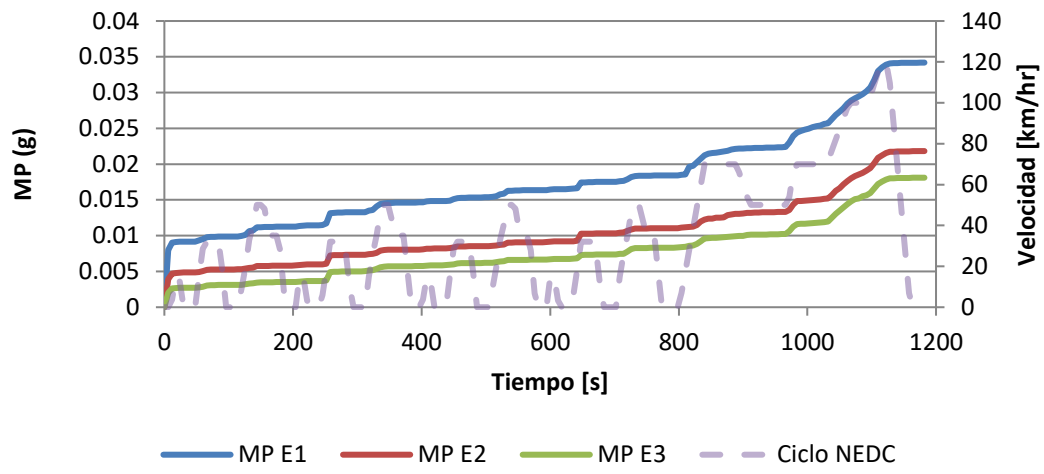
MP10 - B80 - Acumulado Promedio - Grasa animal



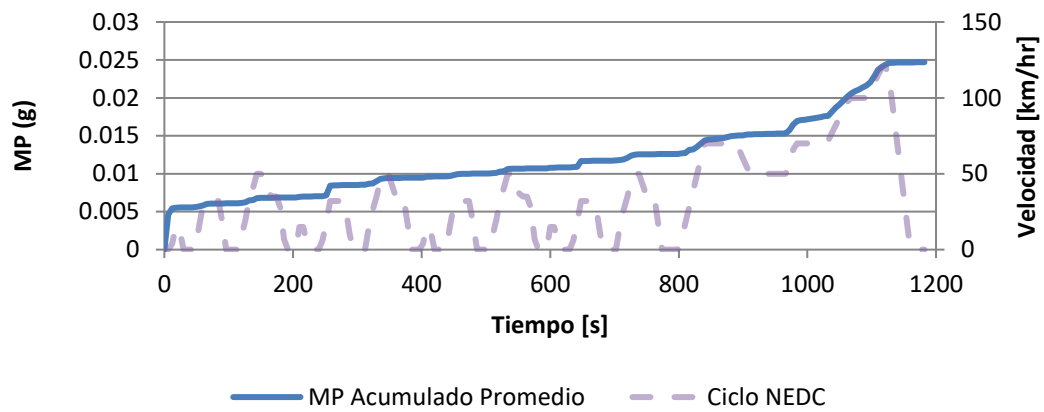
6.2.5 Grasa animal, granulometría de 2.5 μm para distintas mezclas.



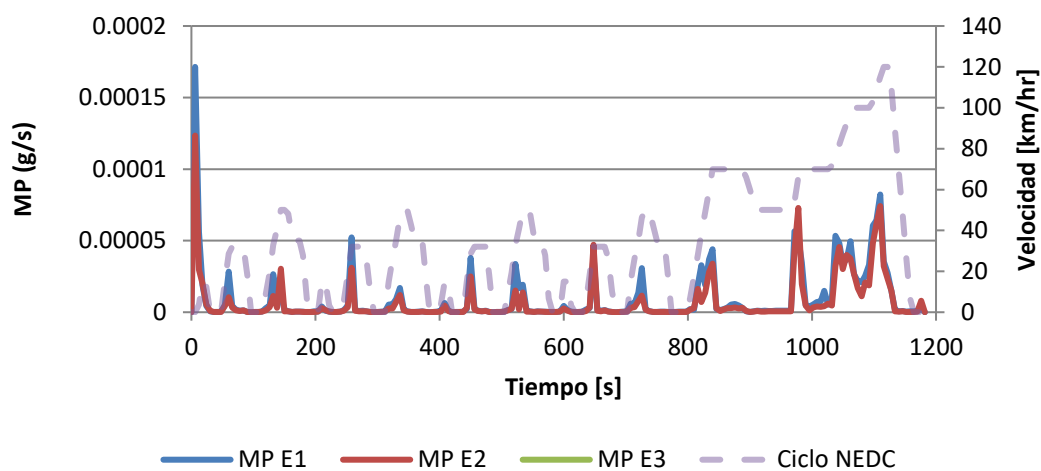
MP2.5 - B0 -Acumulado - Grasa animal



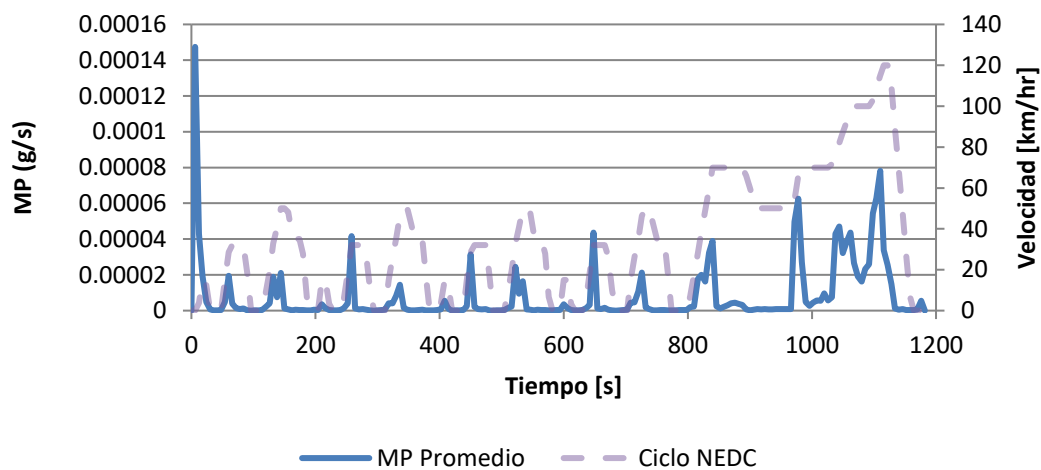
MP2.5 - B0 - Acumulado Promedio - Grasa animal



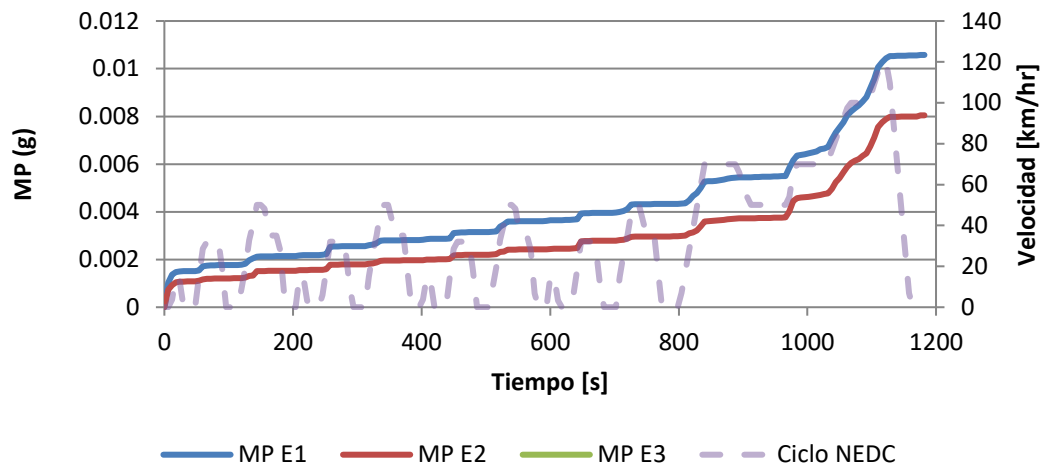
MP2.5 - B5 - Grasa animal



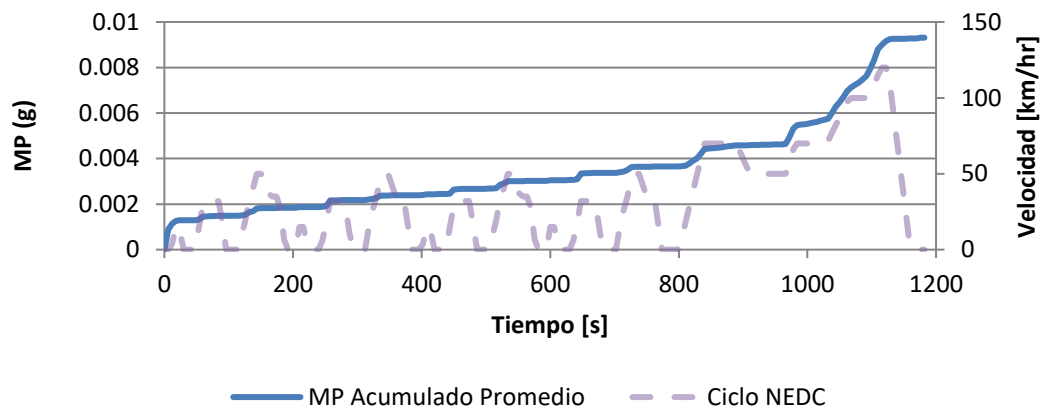
MP2.5 - B5 - Promedio - Grasa animal



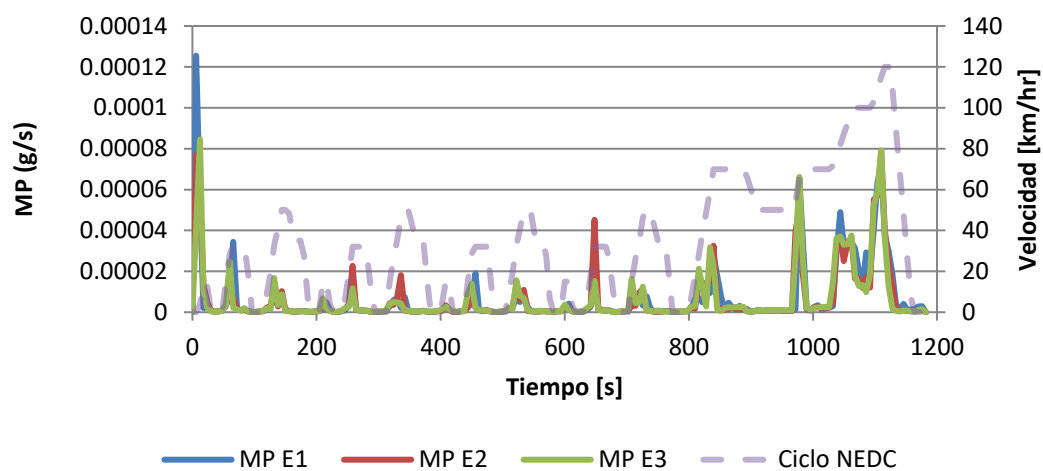
MP2.5 - B5 -Acumulado - Grasa animal



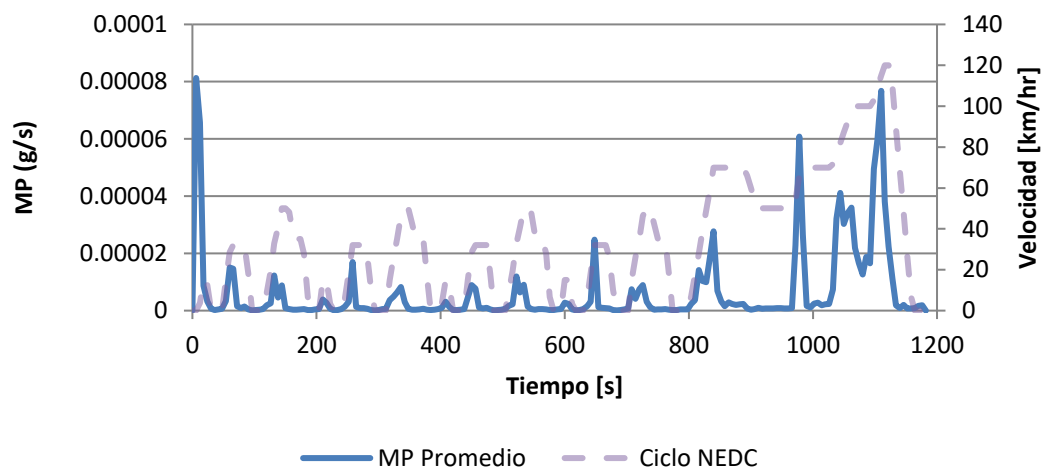
MP2.5 - B5 - Acumulado Promedio - Grasa animal



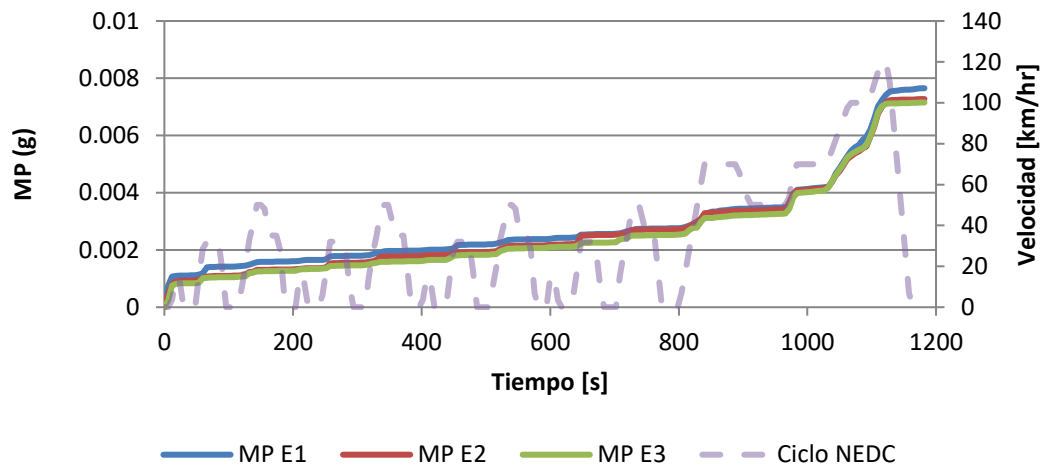
MP2.5 - B20 - Grasa animal



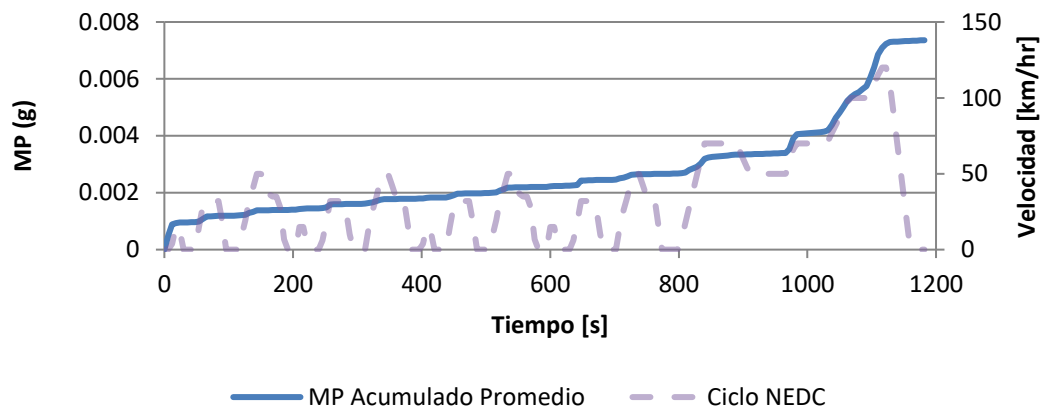
MP2.5 - B20 - Promedio - Grasa animal



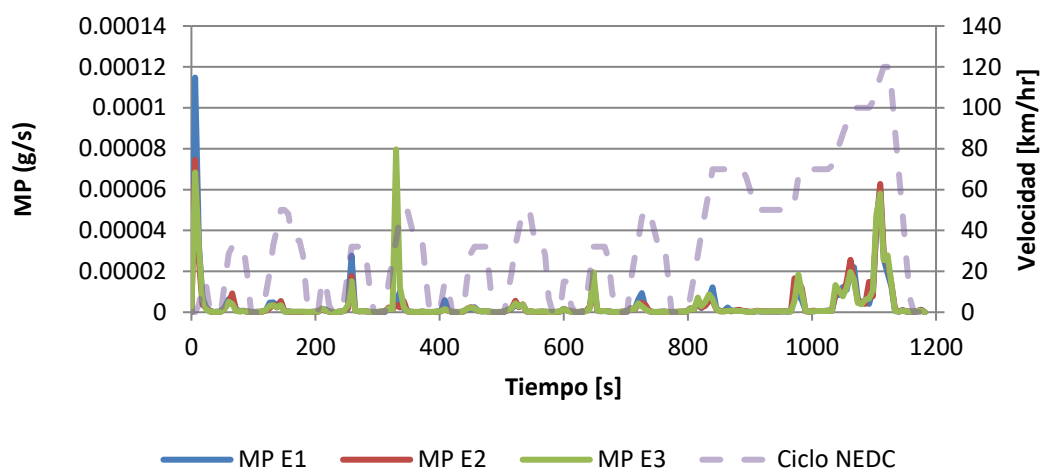
MP2.5 - B20 -Acumulado - Grasa animal



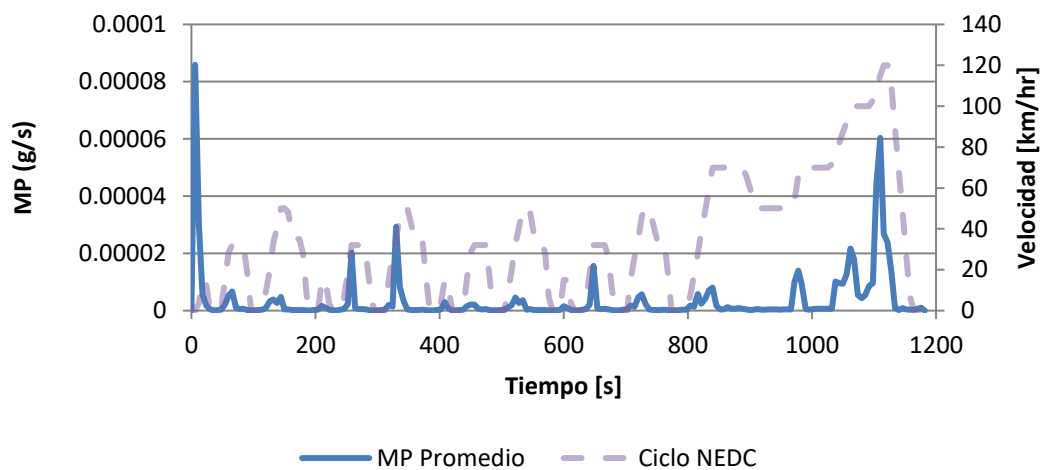
MP2.5 - B20 - Acumulado Promedio - Grasa animal

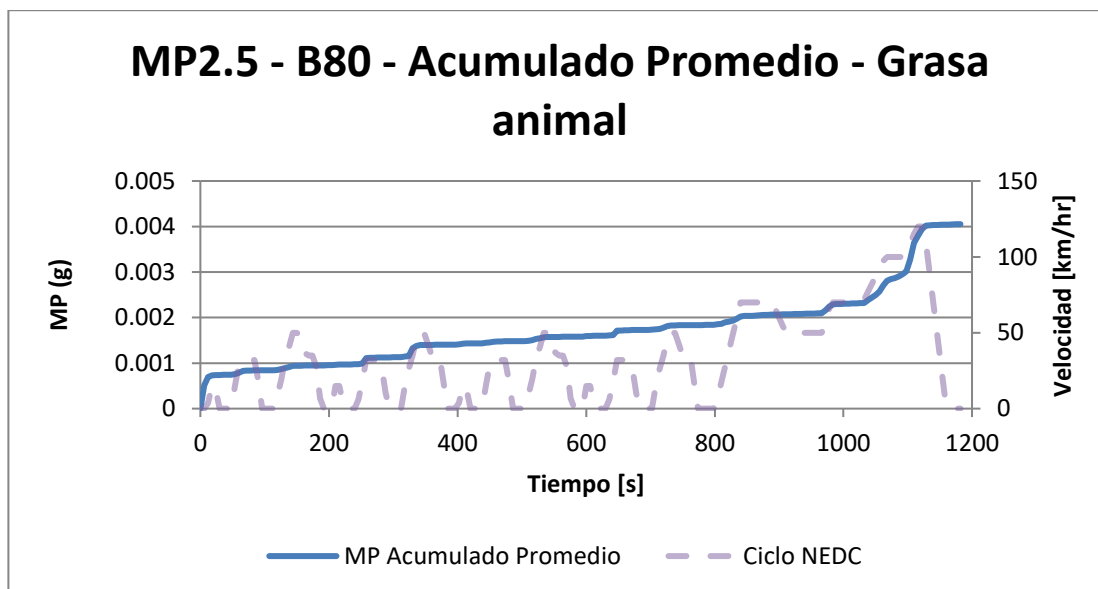
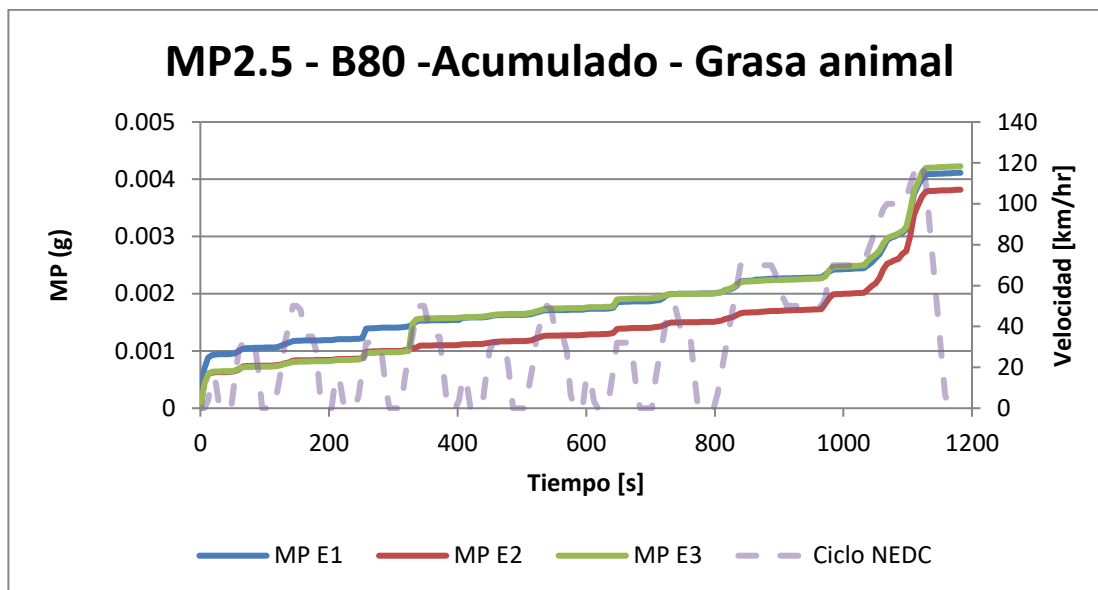


MP2.5 - B80 - Grasa animal

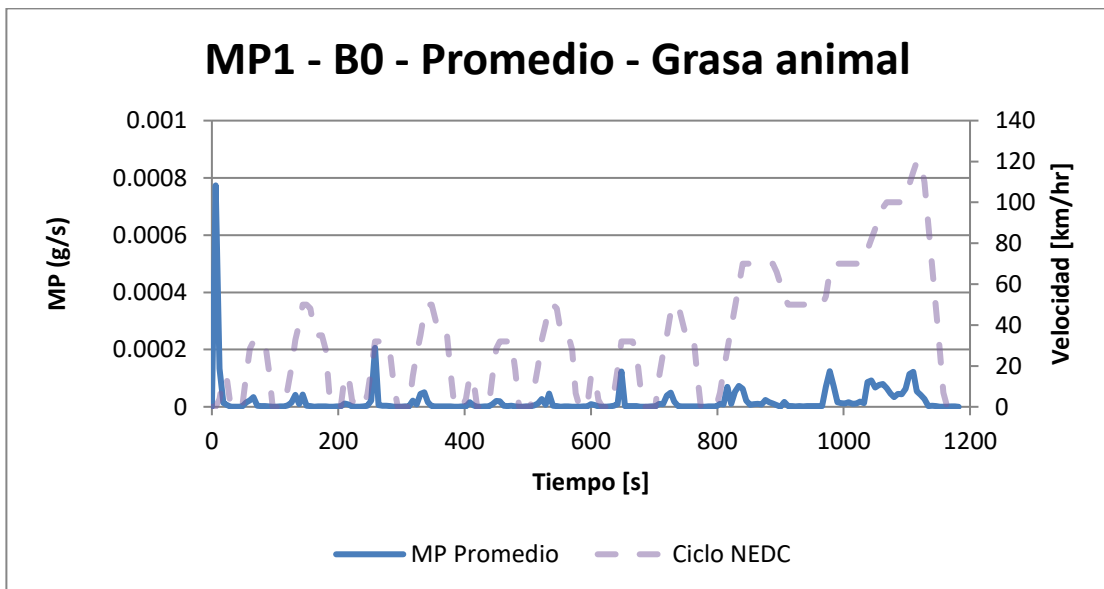
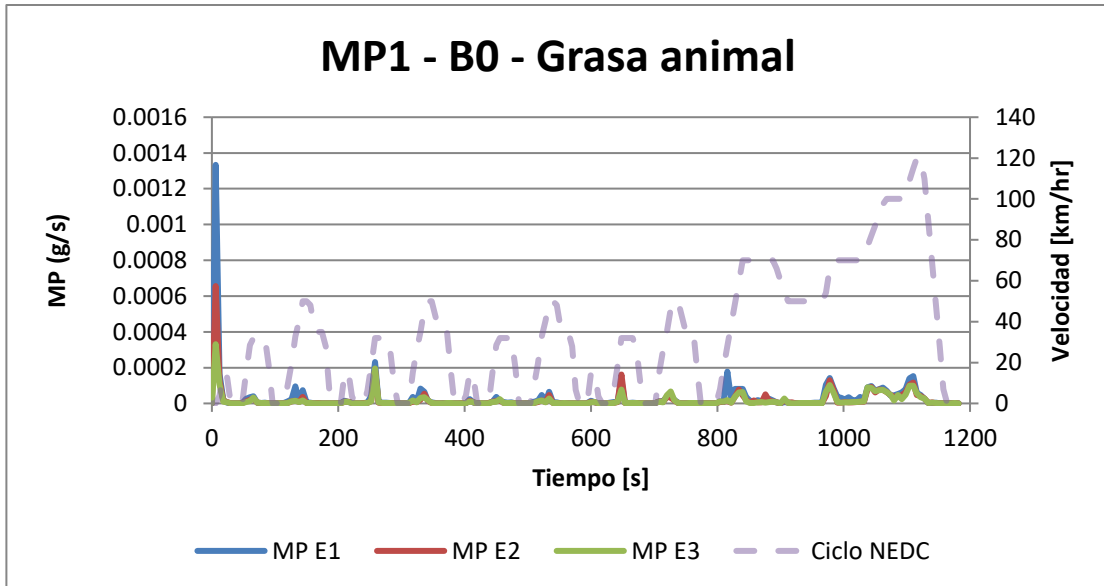


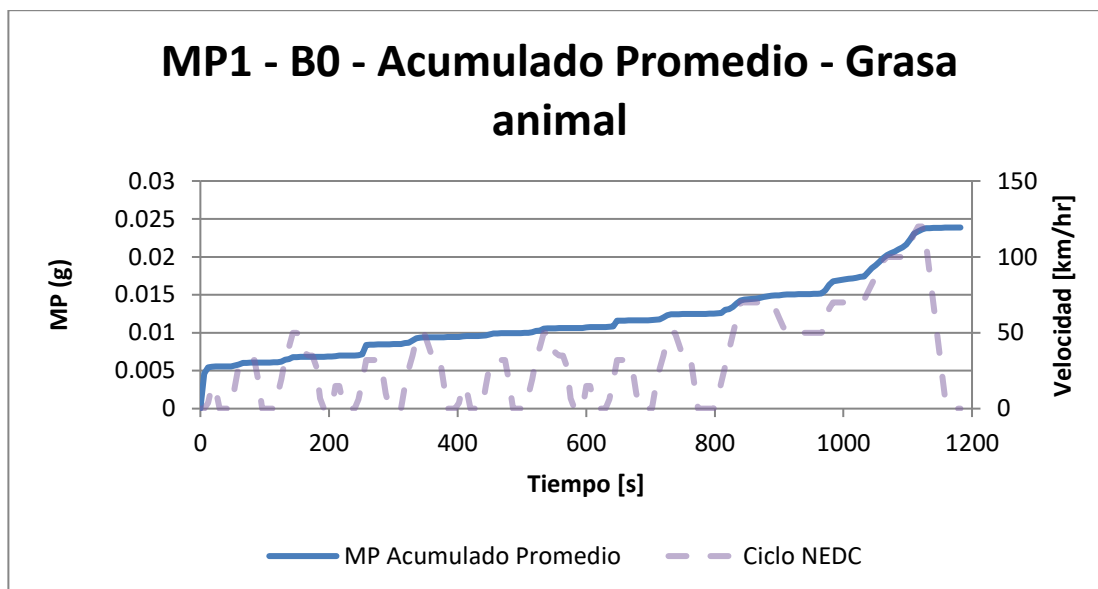
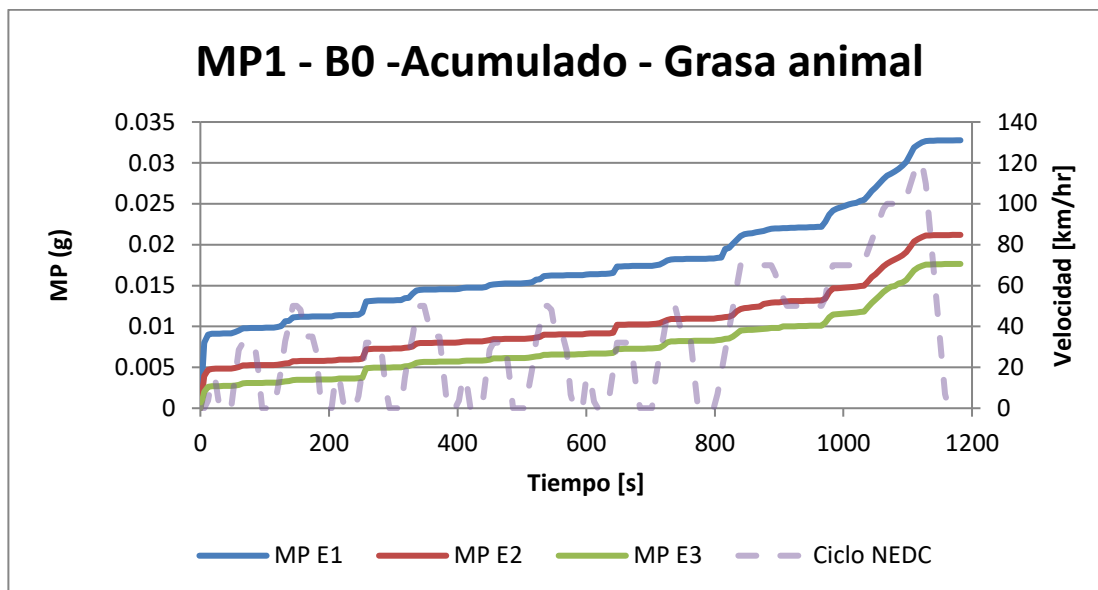
MP2.5 - B80 - Promedio - Grasa animal



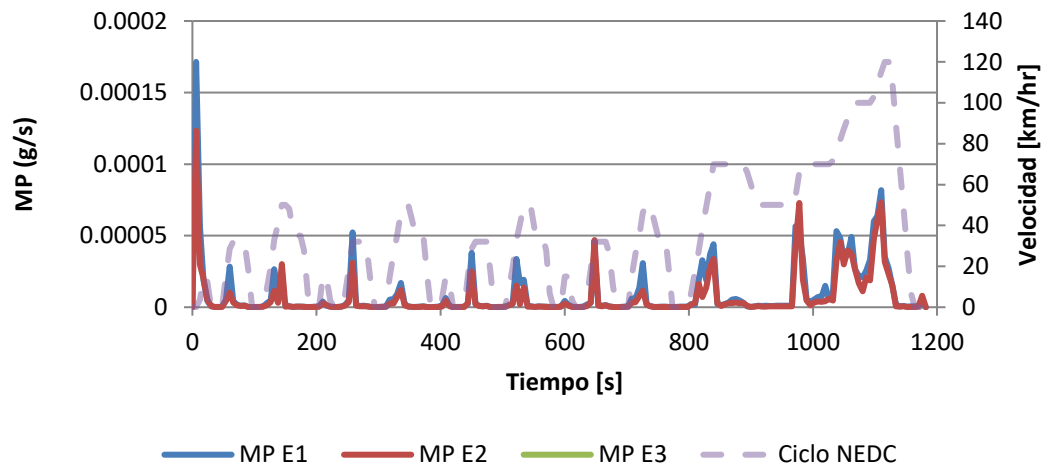


6.2.6 Grasa animal, granulometría de 1 μm para distintas mezclas.

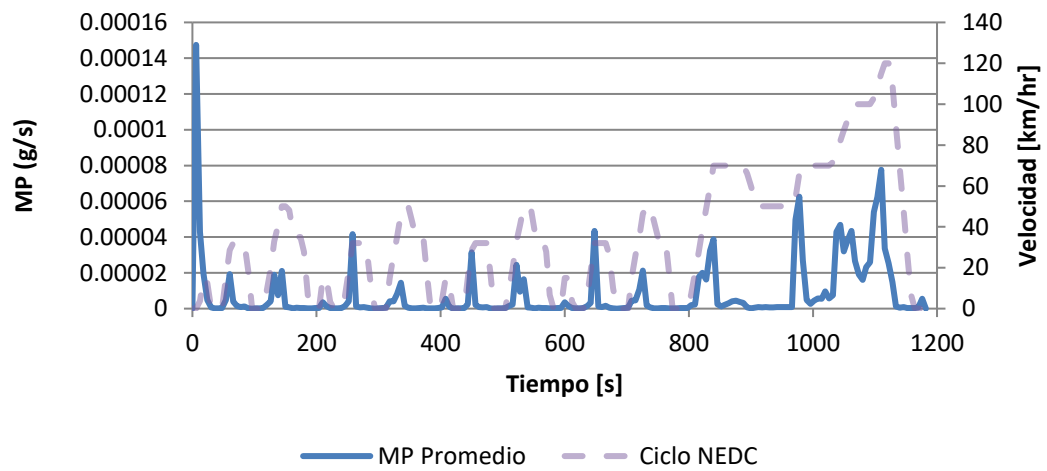


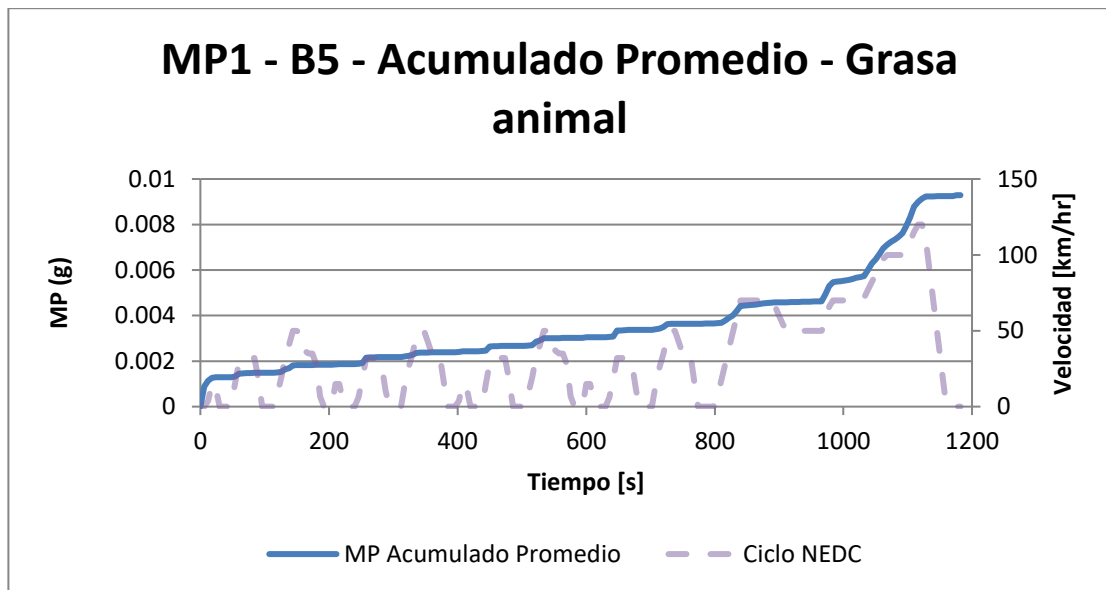
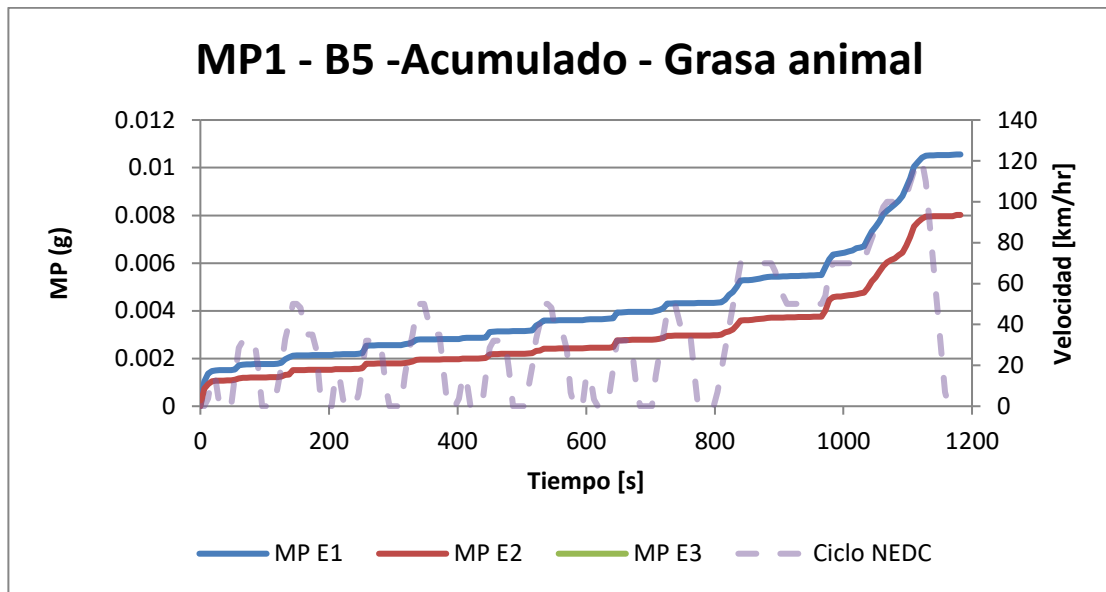


MP1 - B5 - Grasa animal

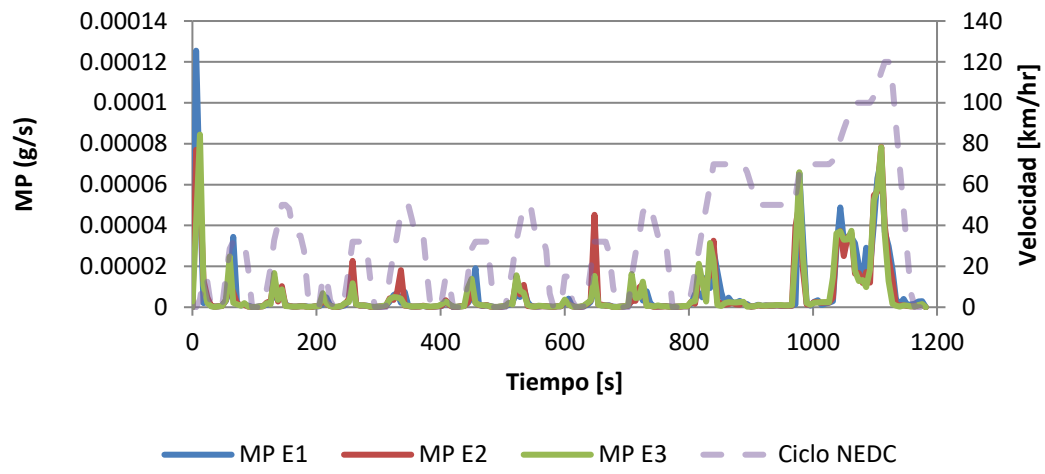


MP1 - B5 - Promedio - Grasa animal

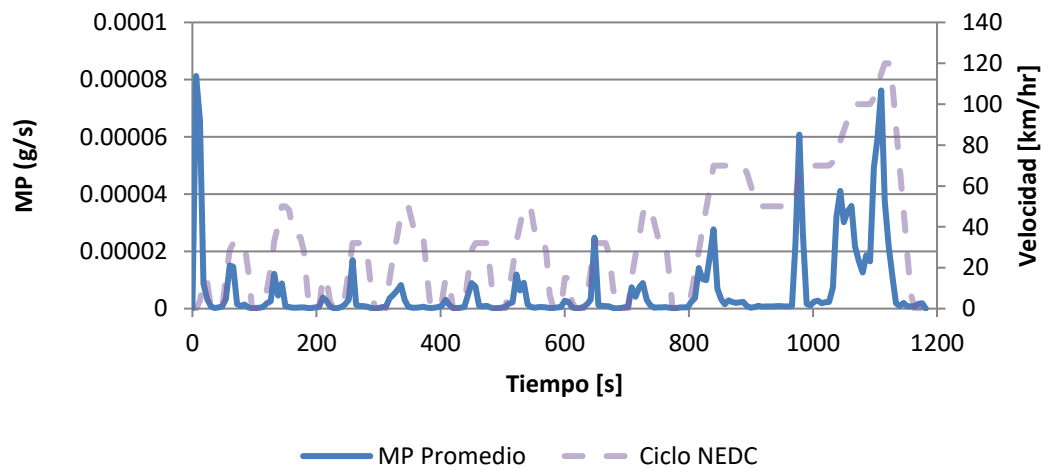


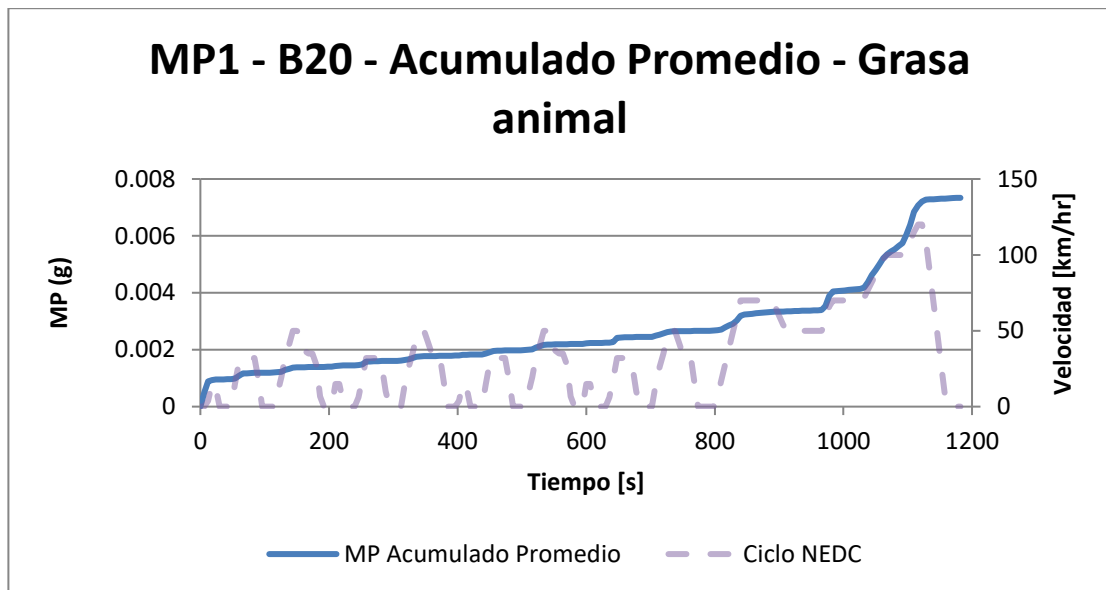
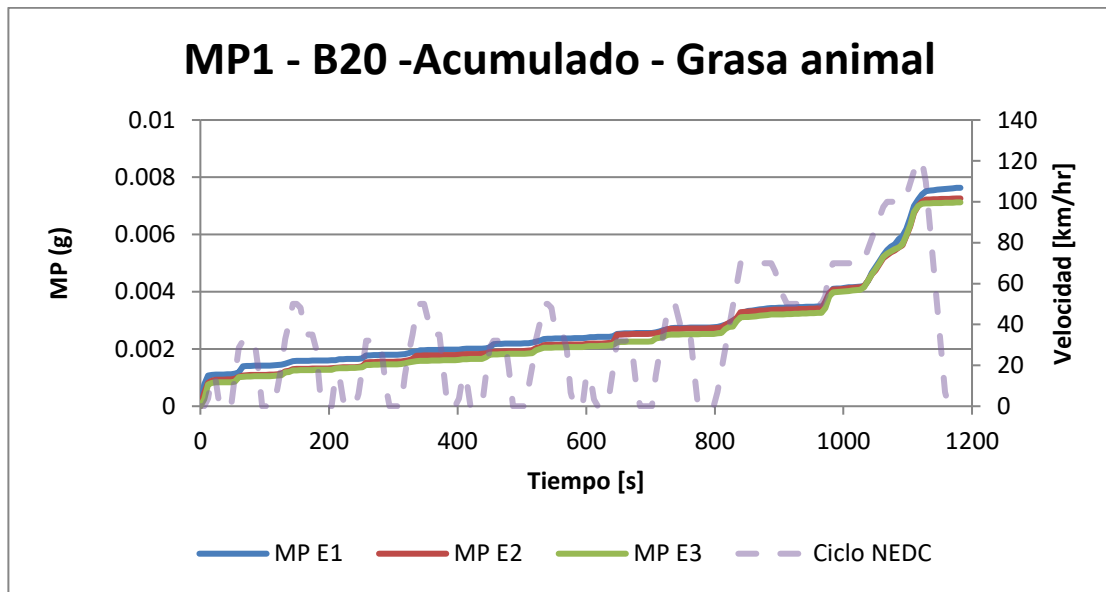


MP1 - B20 - Grasa animal

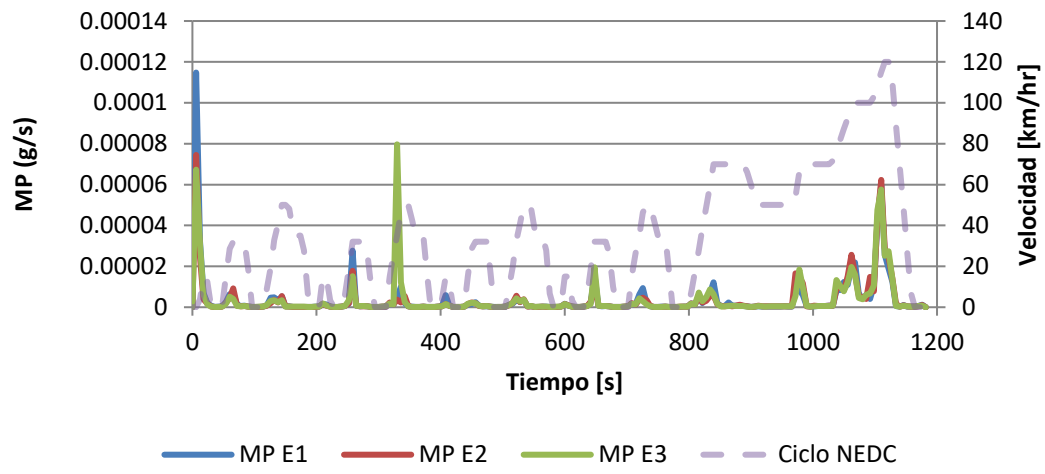


MP1 - B20 - Promedio - Grasa animal

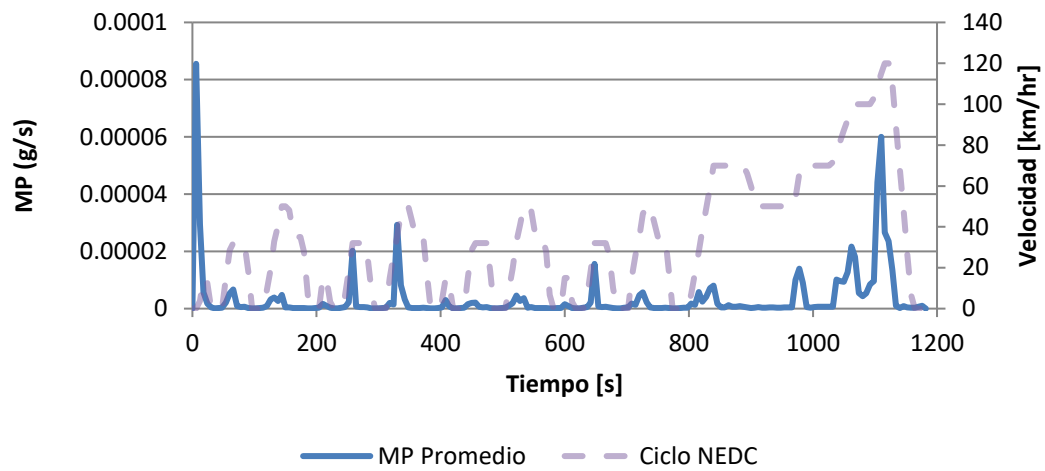


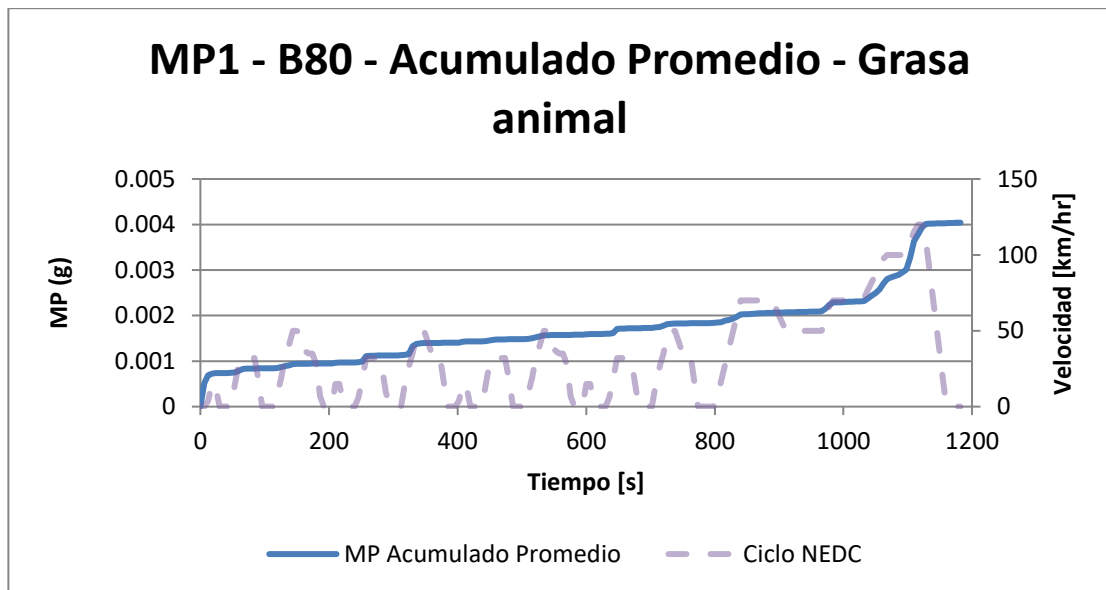
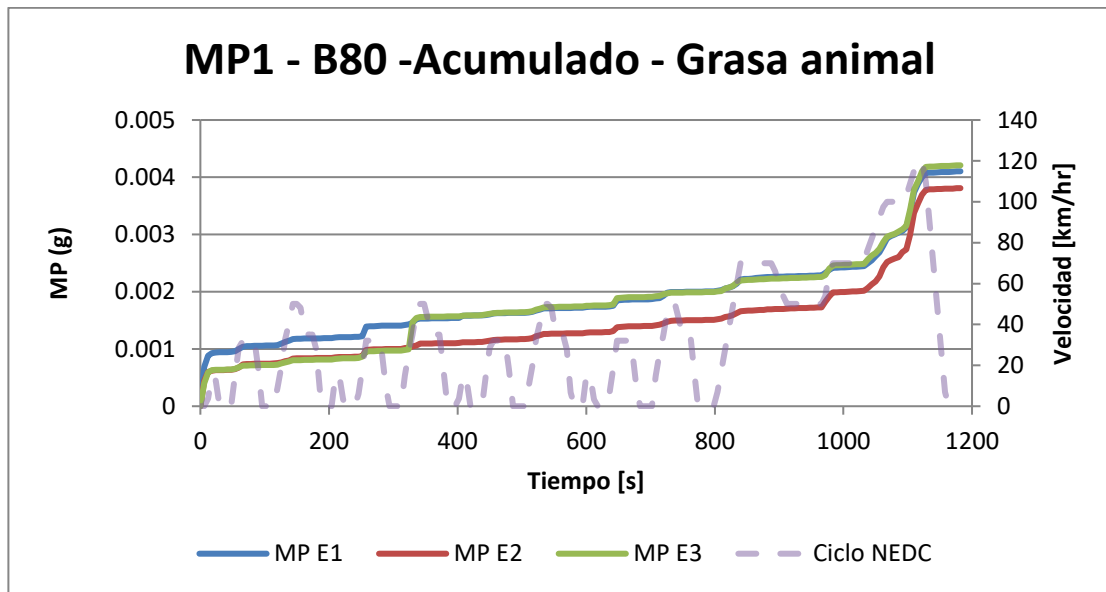


MP1 - B80 - Grasa animal

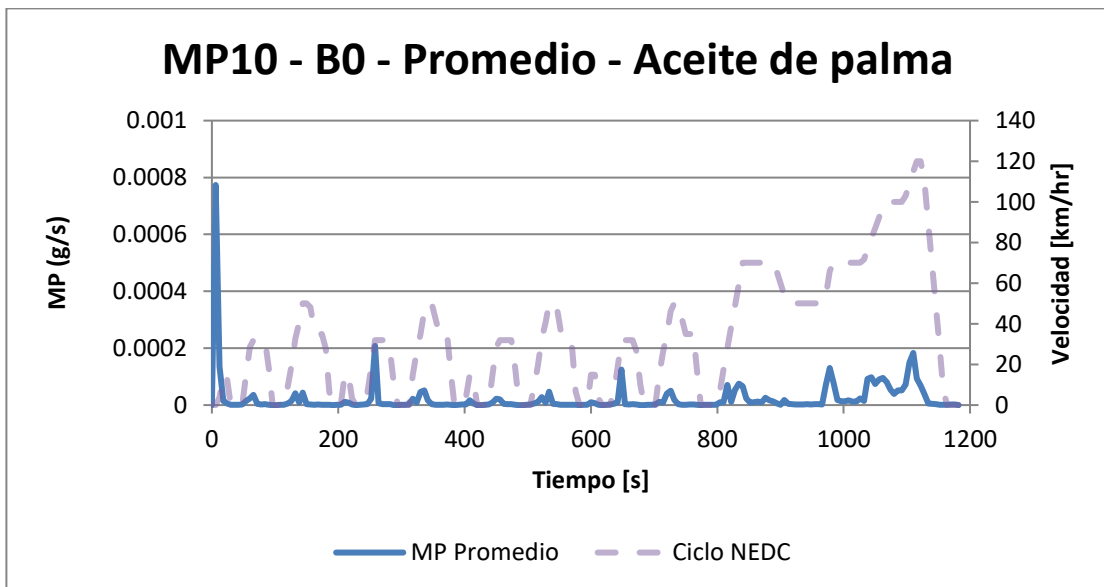
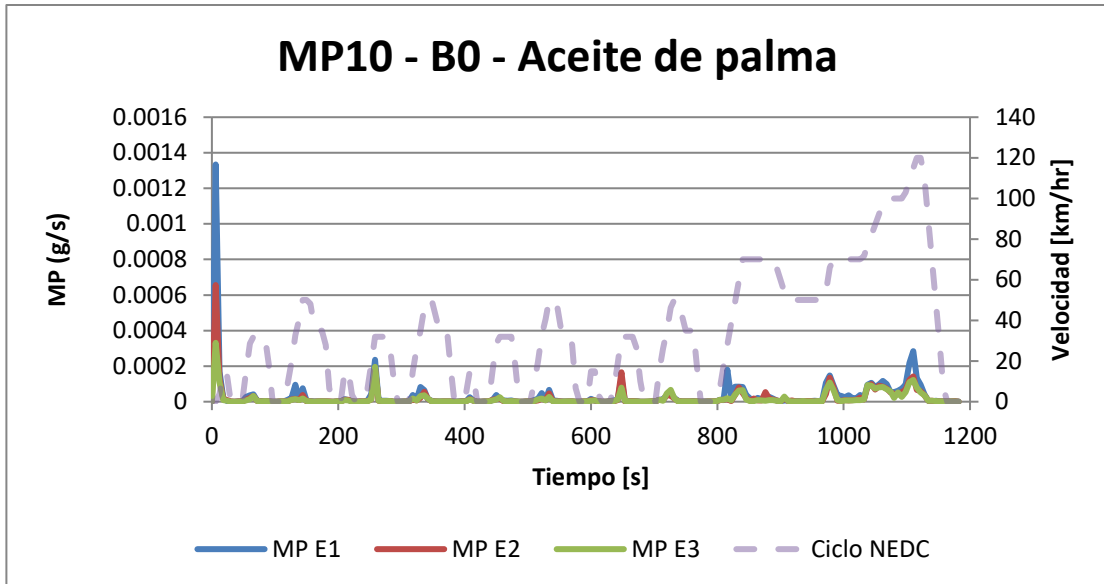


MP1 - B80 - Promedio - Grasa animal

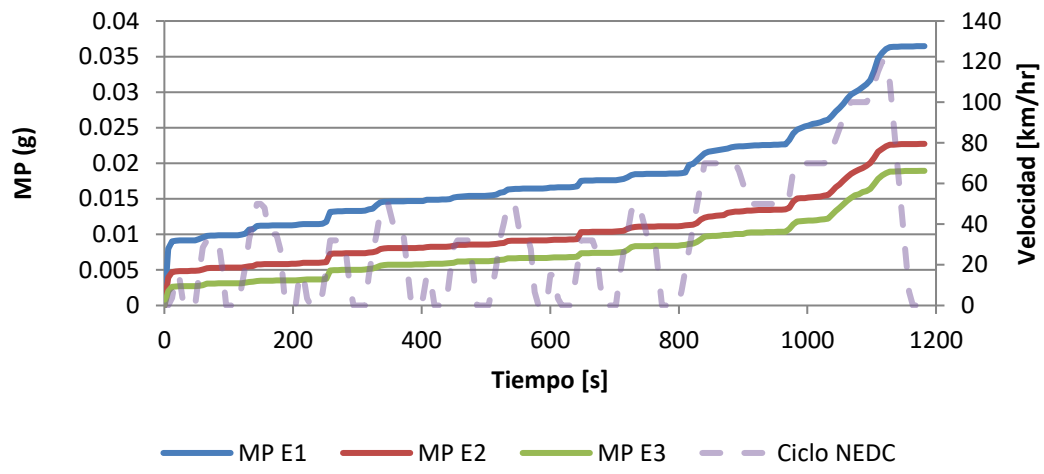




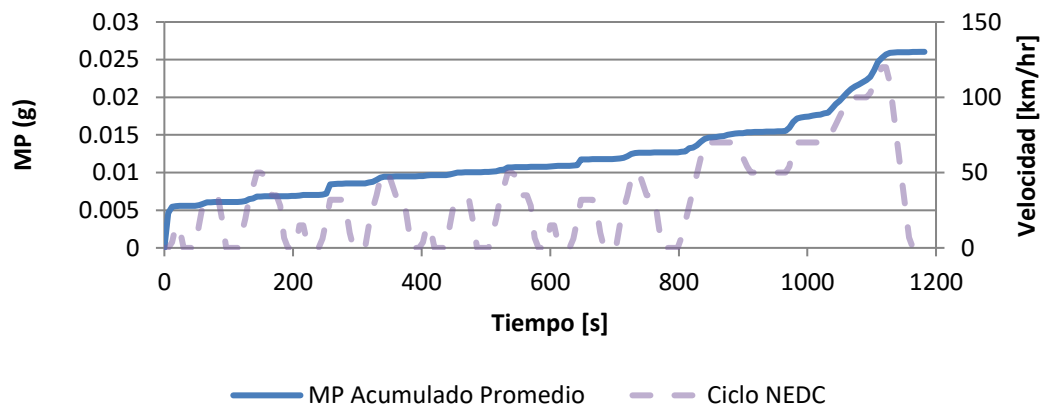
6.2.7 Aceite de palma, granulometría de 10 μm para distintas mezclas.

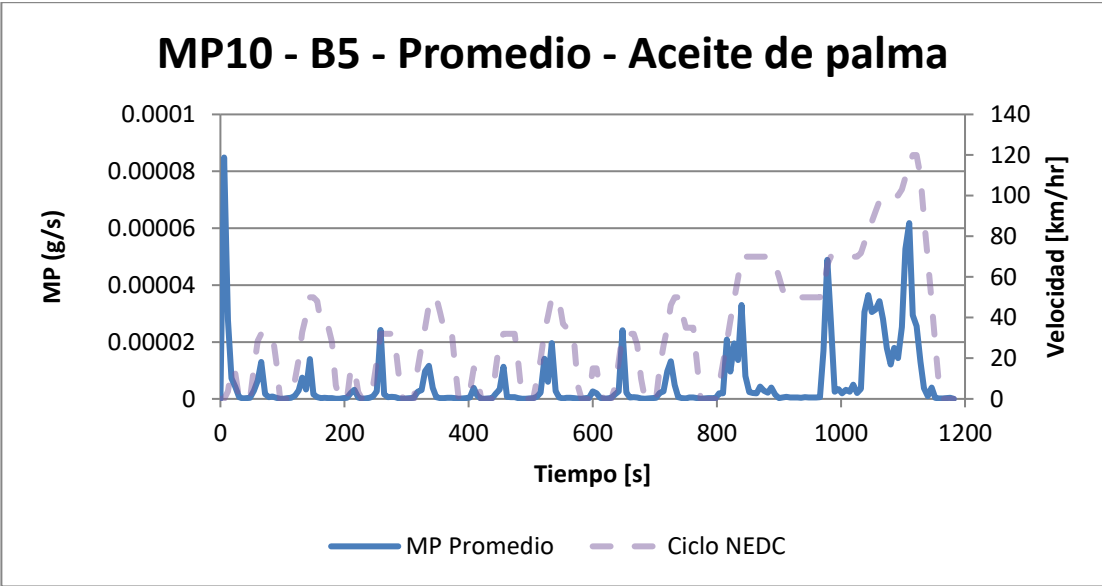
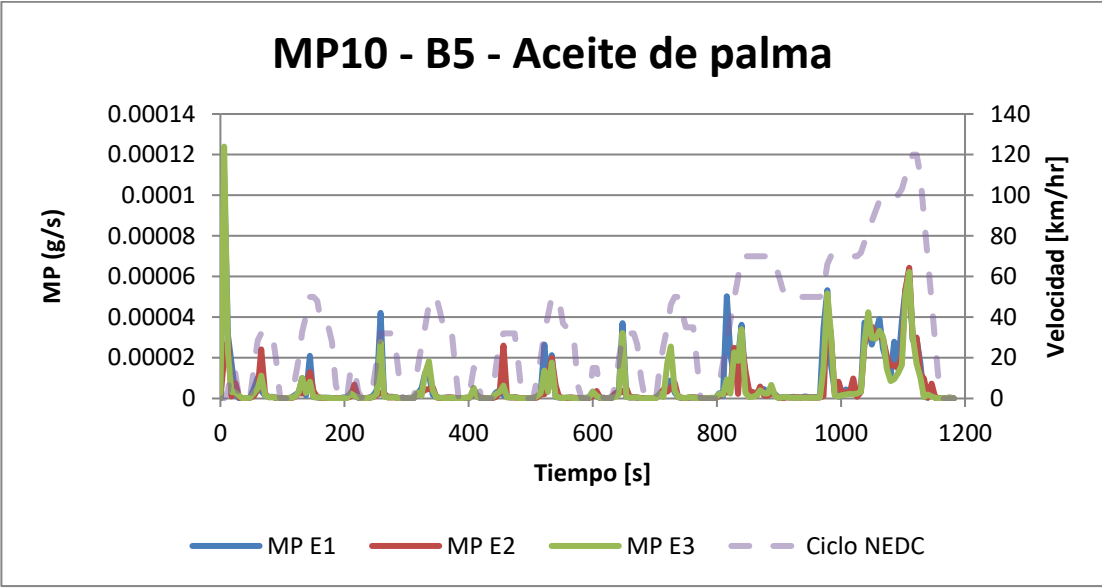


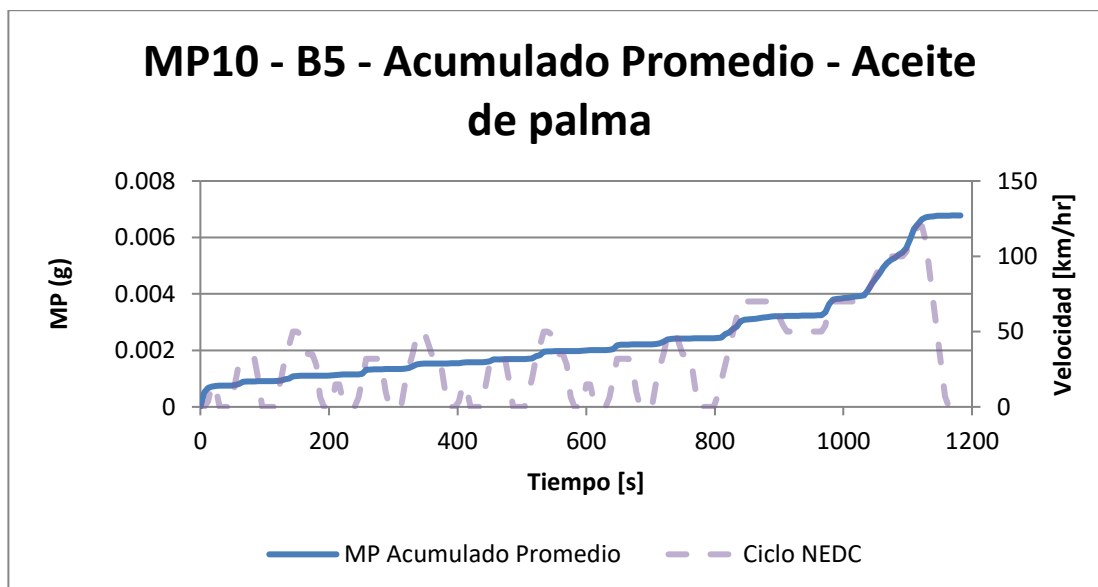
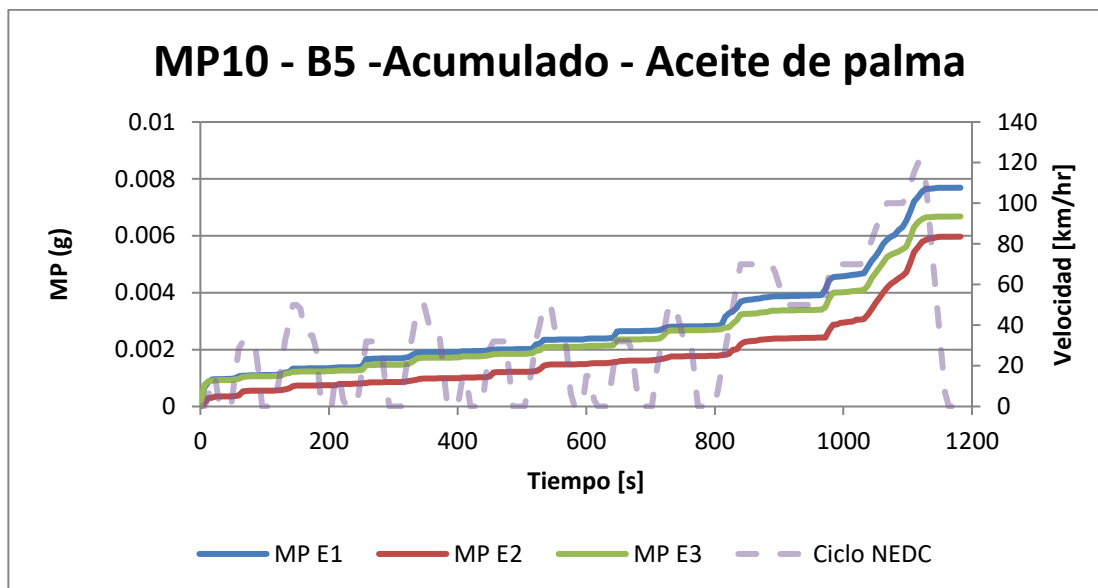
MP10 - B0 -Acumulado - Aceite de palma

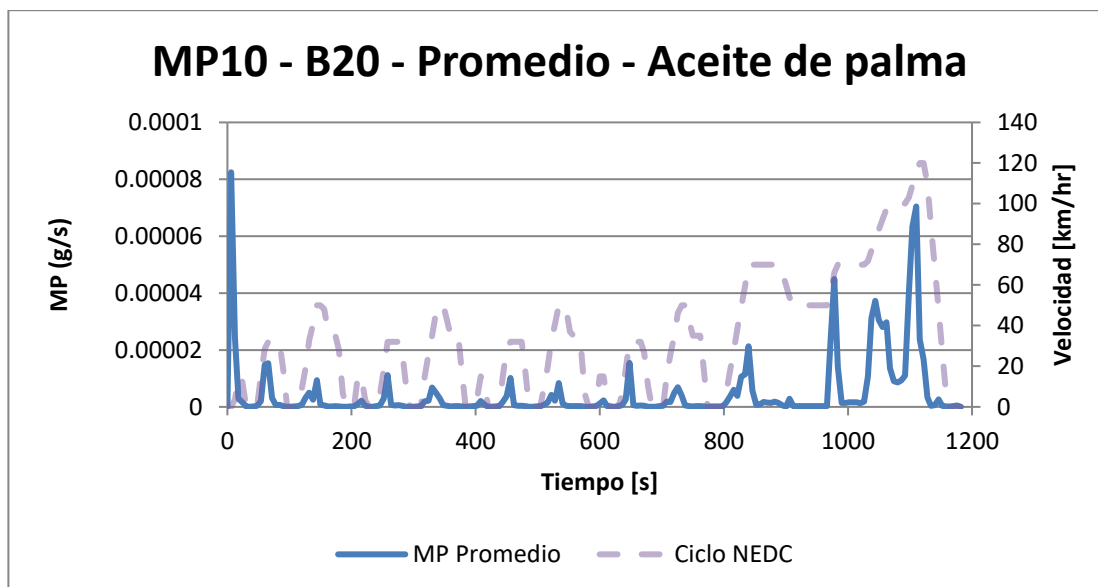
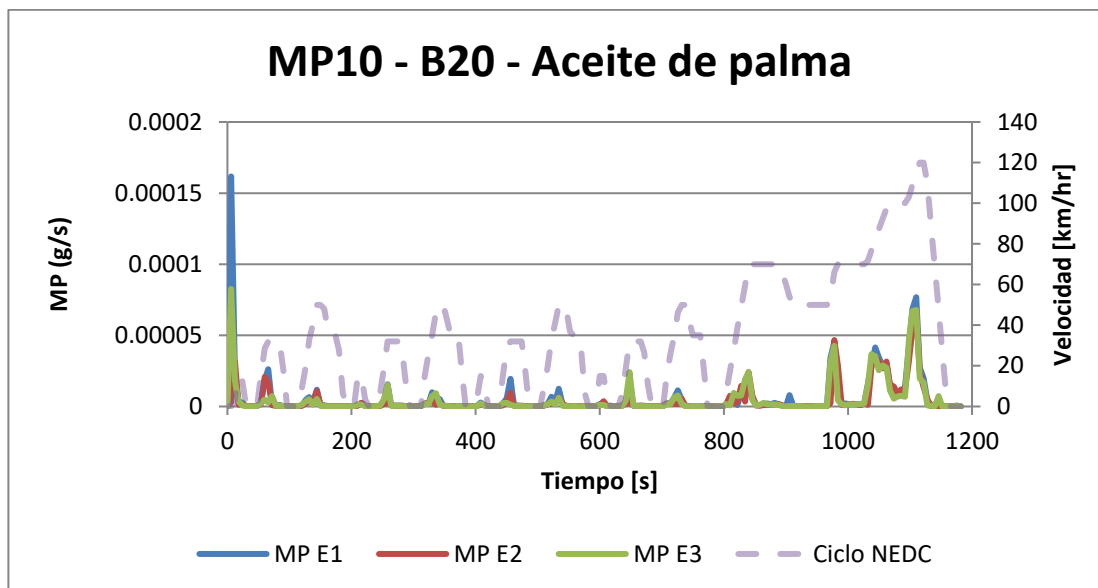


MP10 - B0 - Acumulado Promedio - Aceite de palma

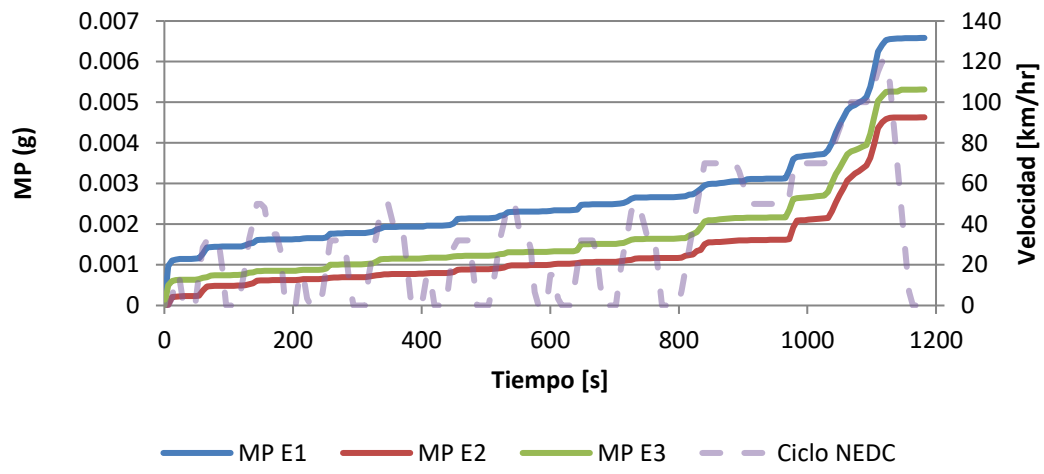




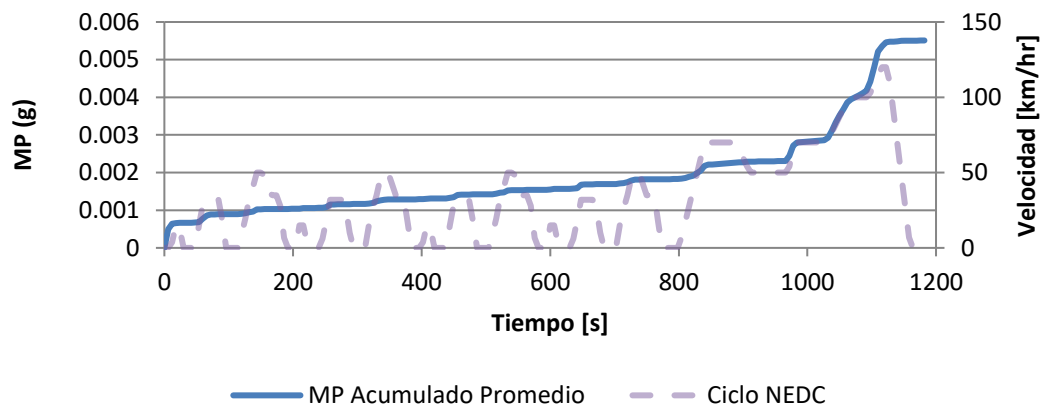


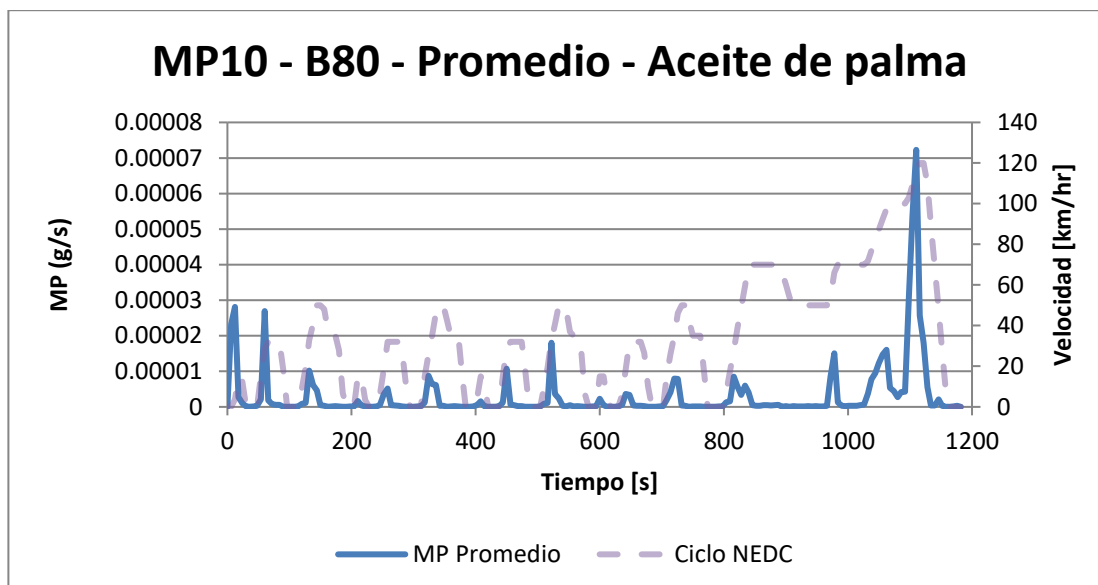
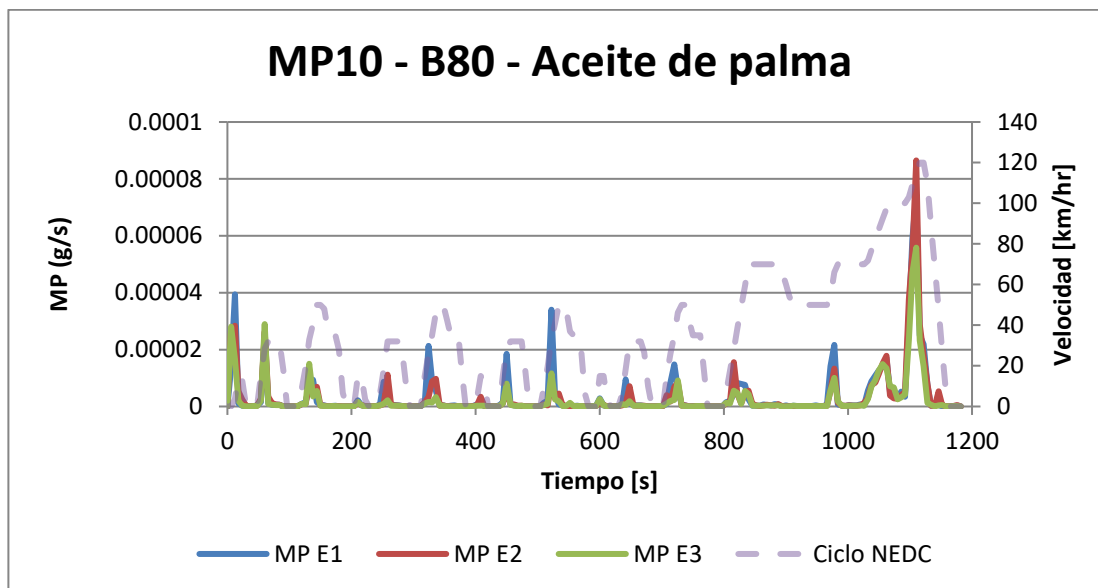


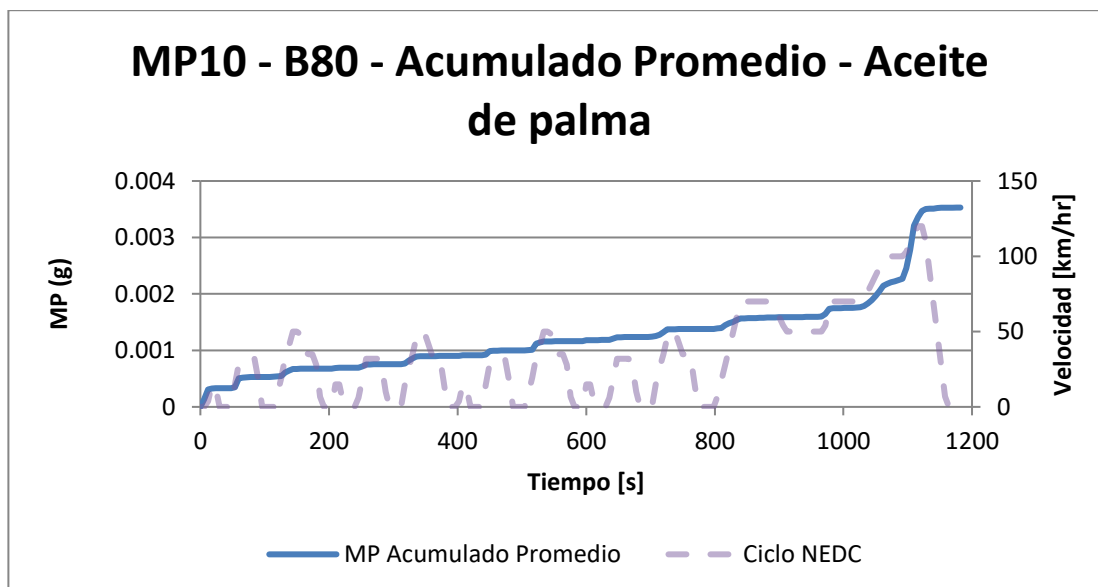
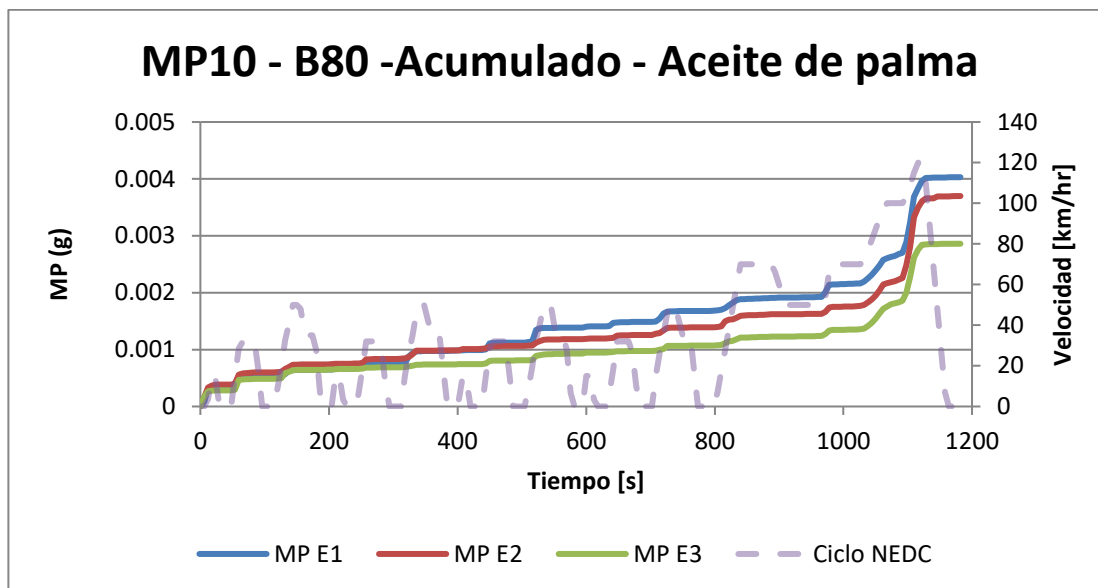
MP10 - B20 -Acumulado - Aceite de palma



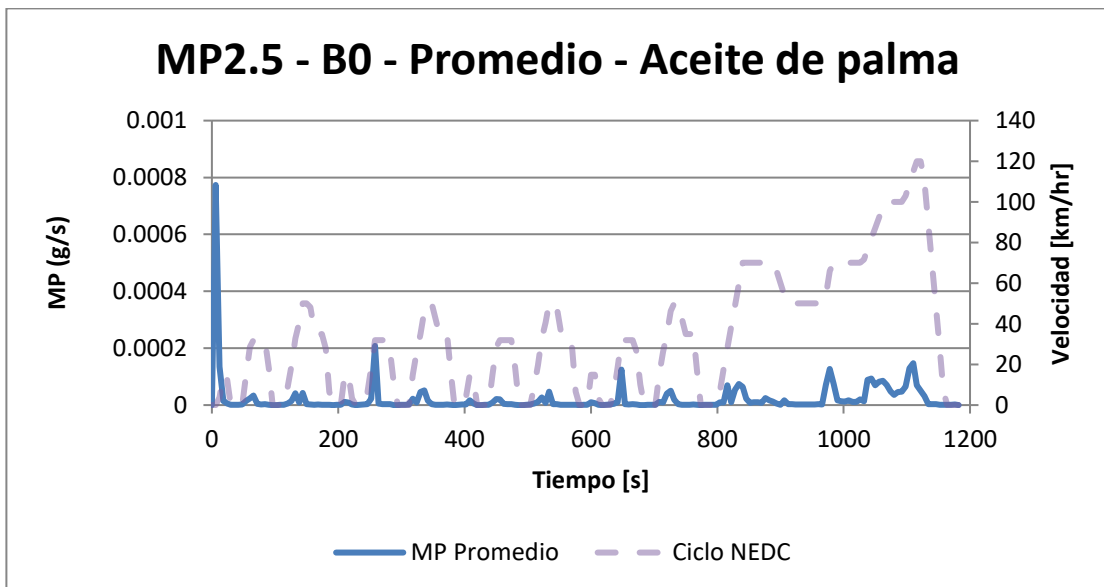
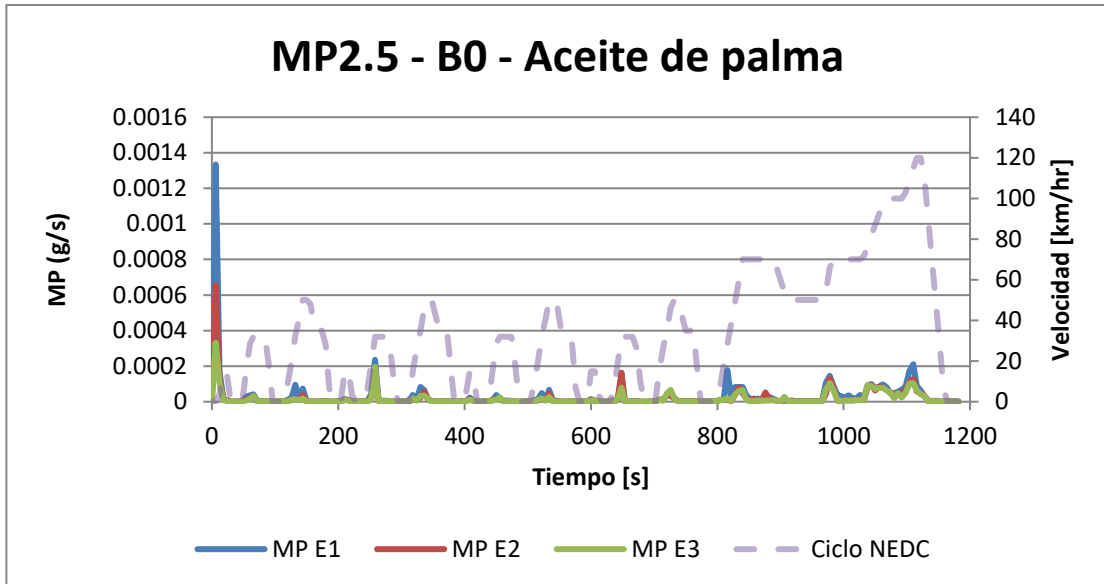
MP10 - B20 - Acumulado Promedio - Aceite de palma



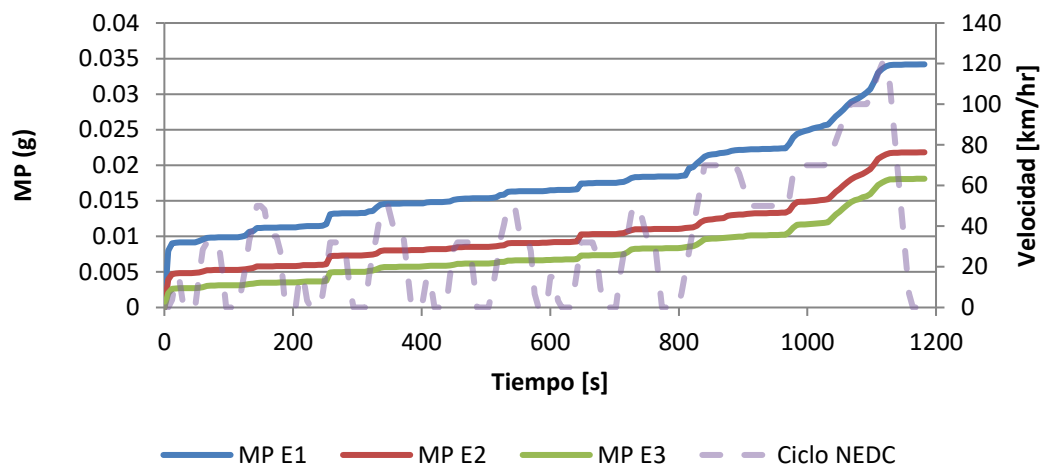




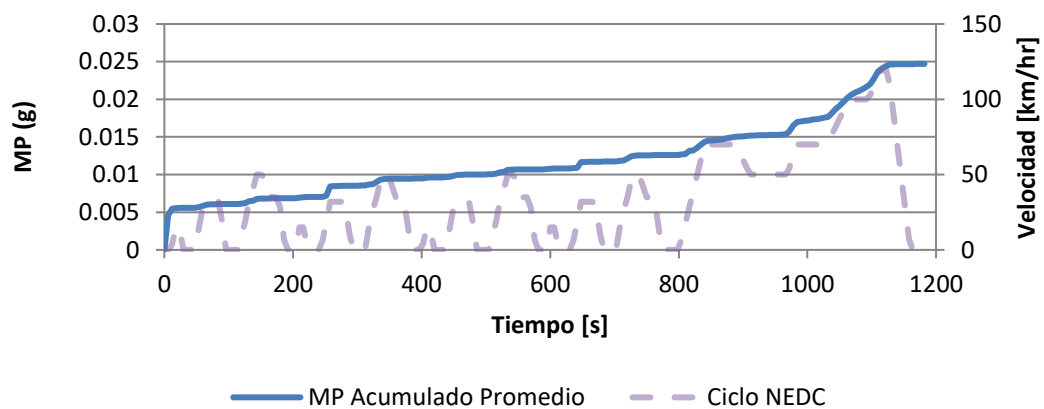
6.2.8 Aceite de palma, granulometría de 2.5 μm para distintas mezclas.



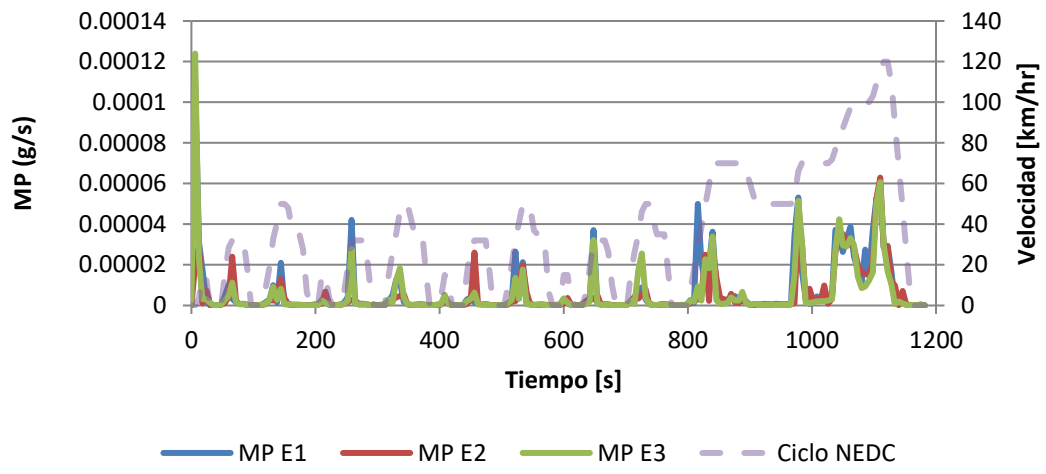
MP2.5 - B0 -Acumulado - Aceite de palma



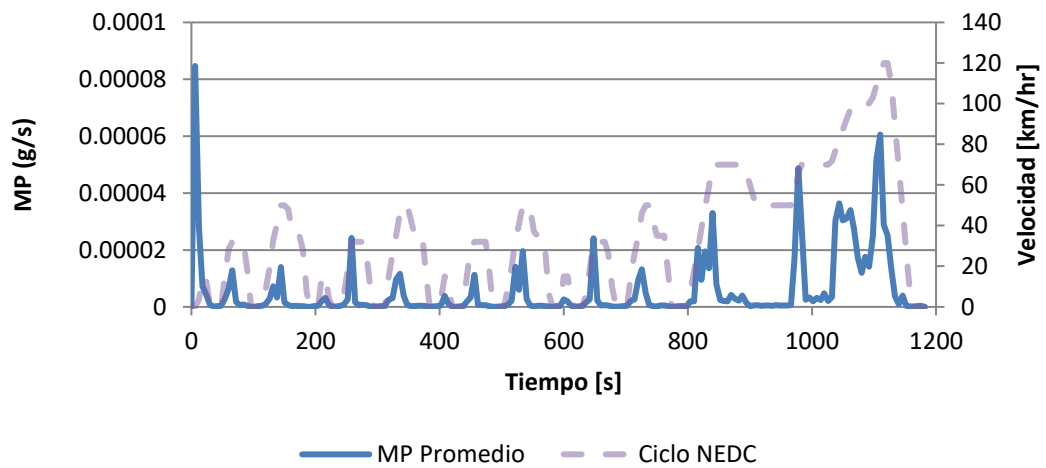
MP2.5 - B0 - Acumulado Promedio - Aceite de palma

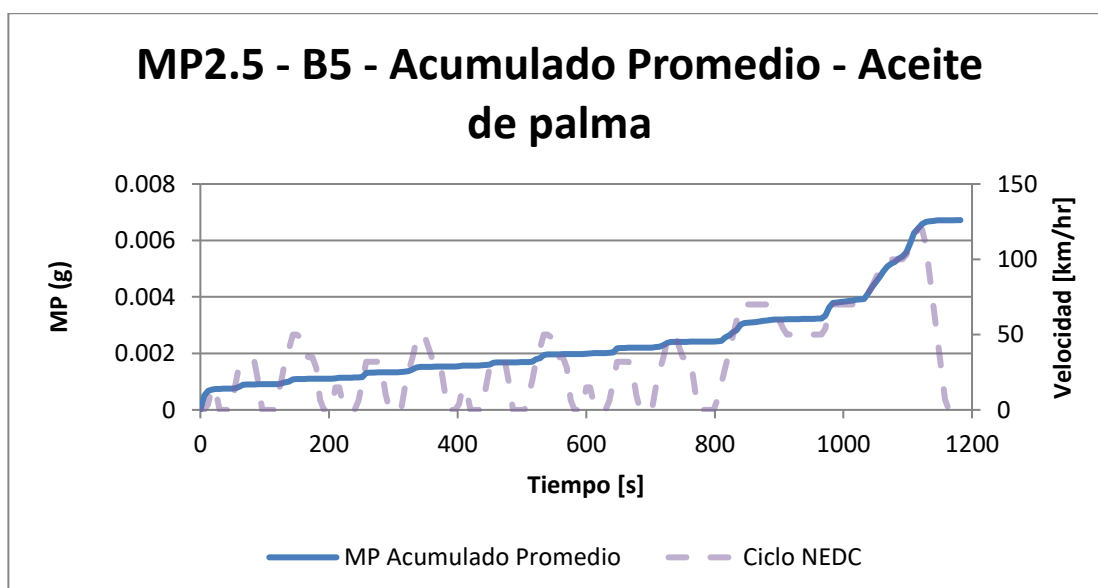
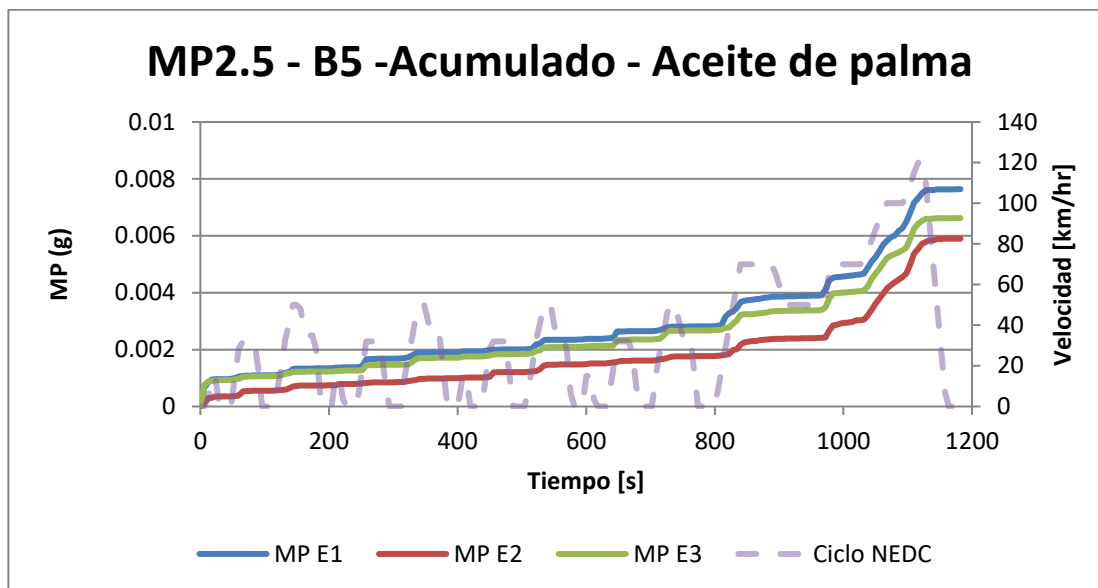


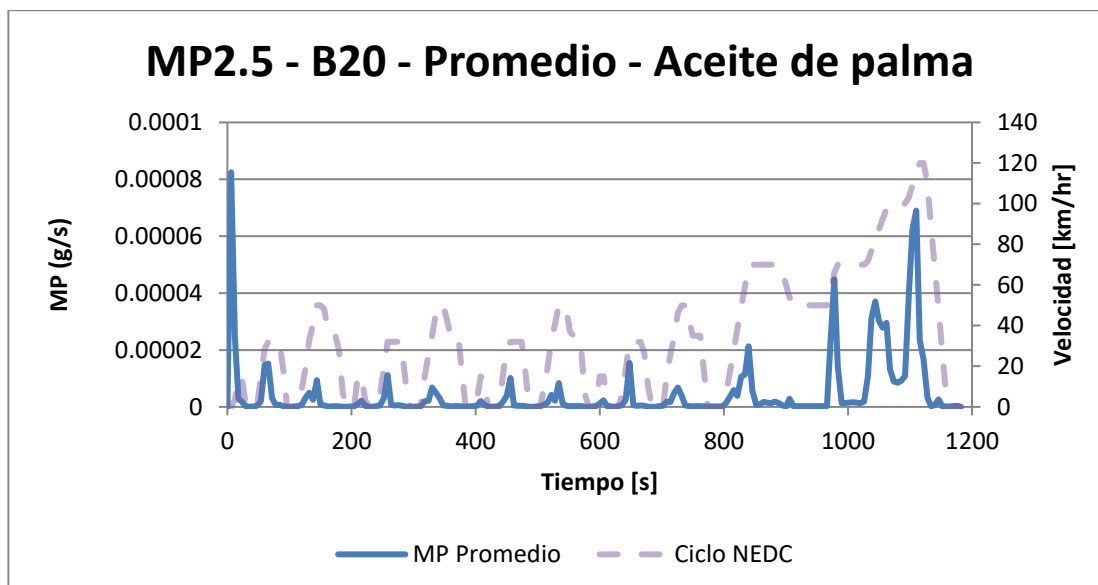
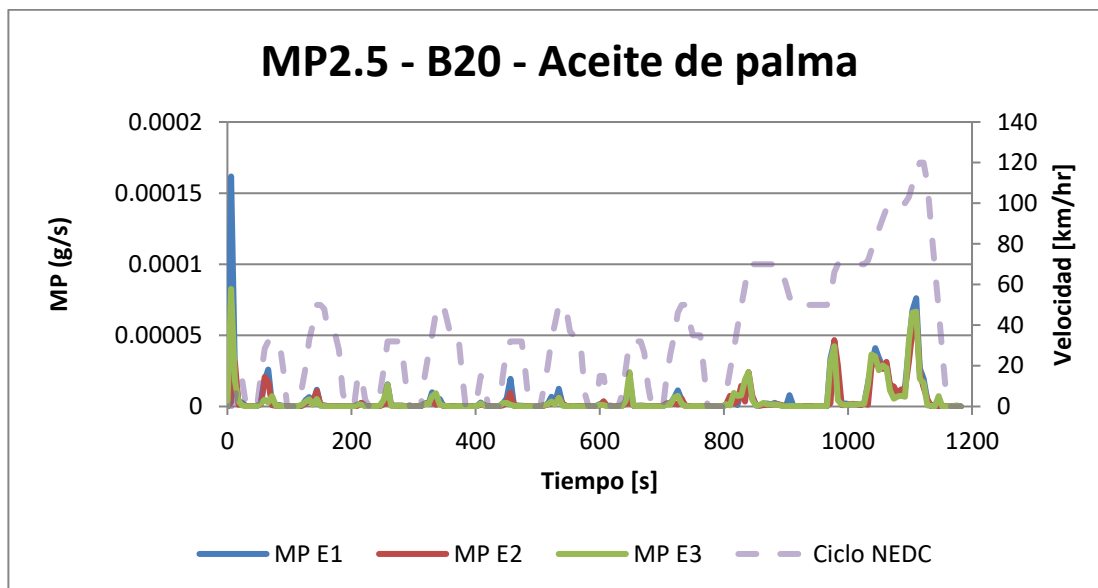
MP2.5 - B5 - Aceite de palma



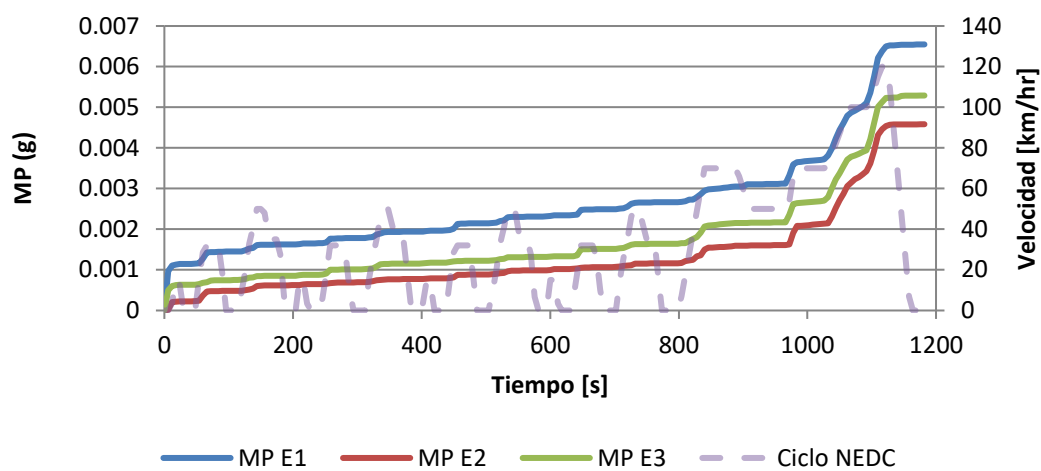
MP2.5 - B5 - Promedio - Aceite de palma



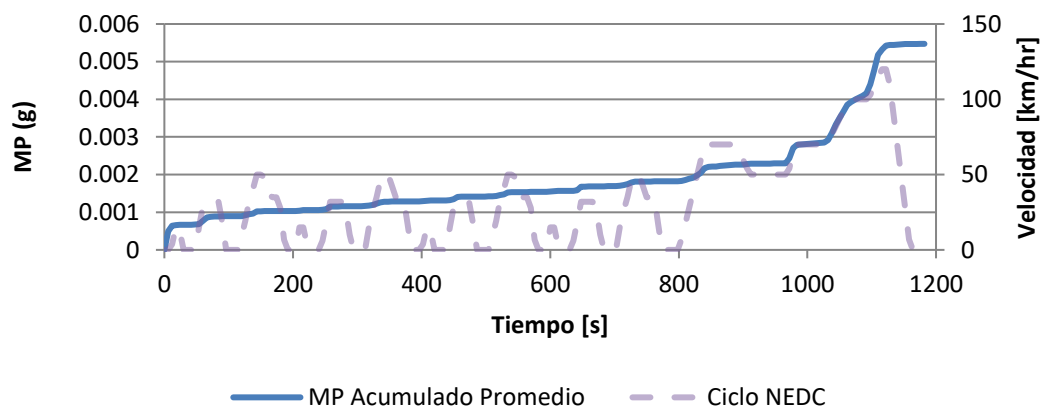


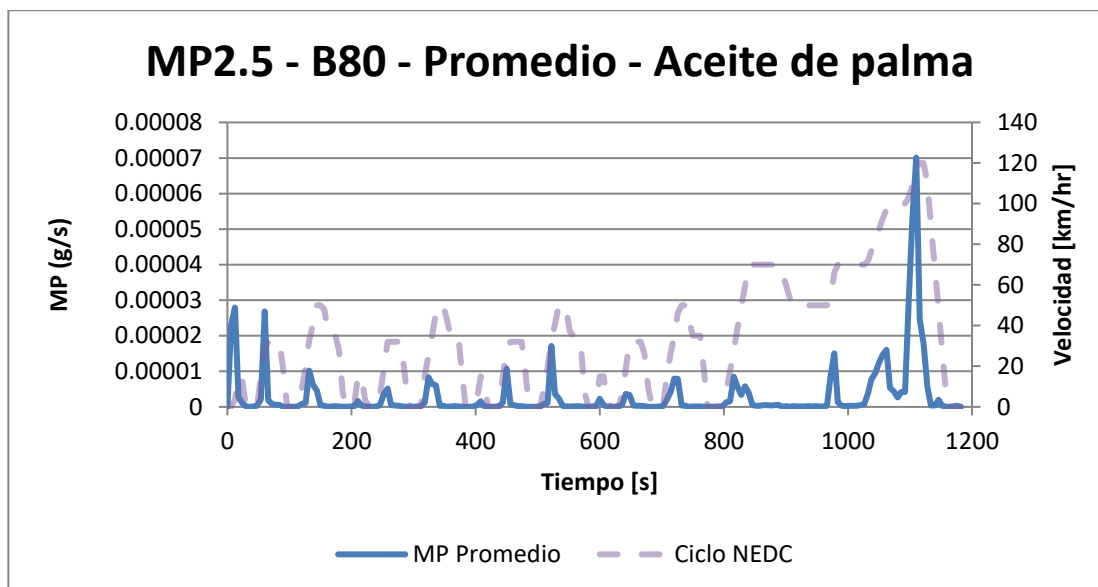
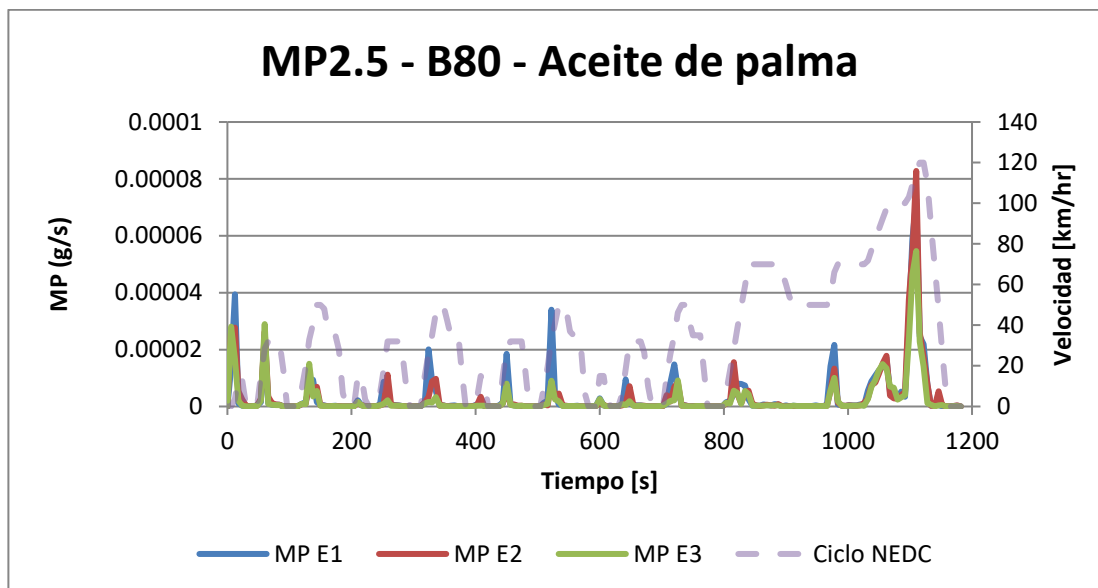


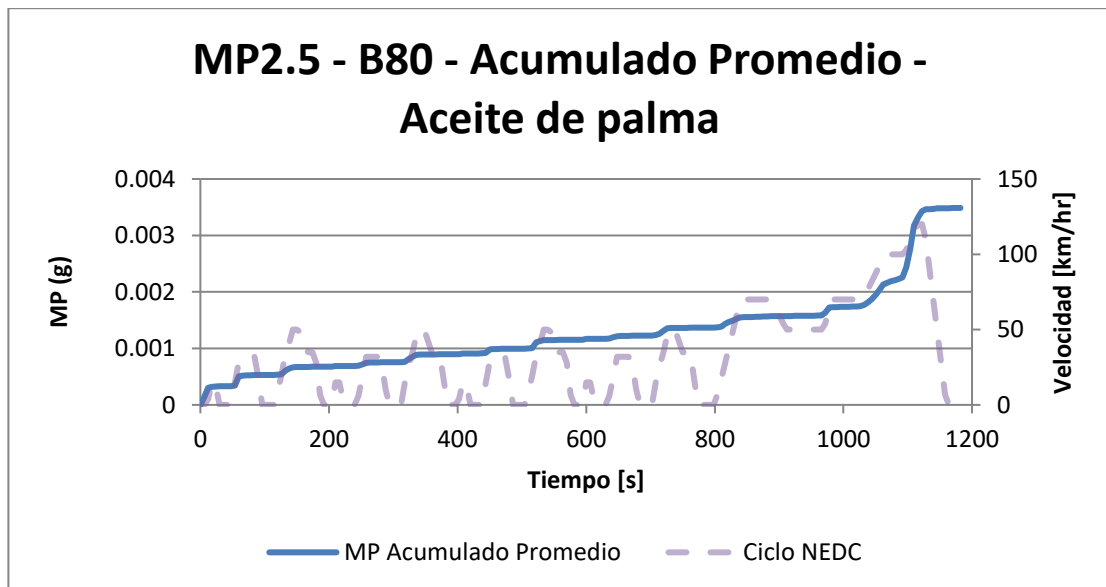
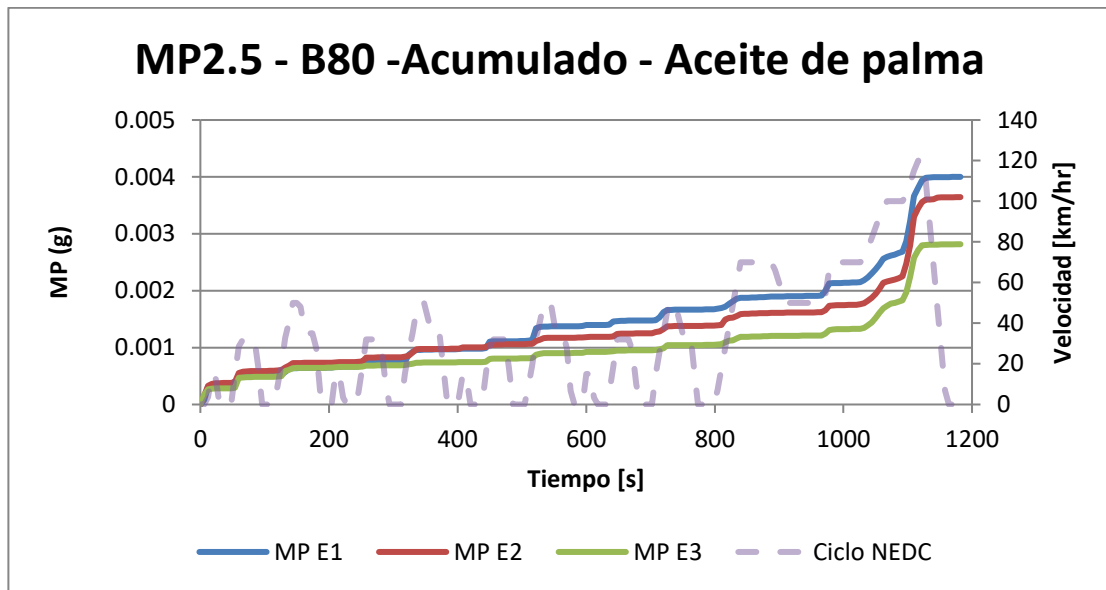
MP2.5 - B20 -Acumulado - Aceite de palma



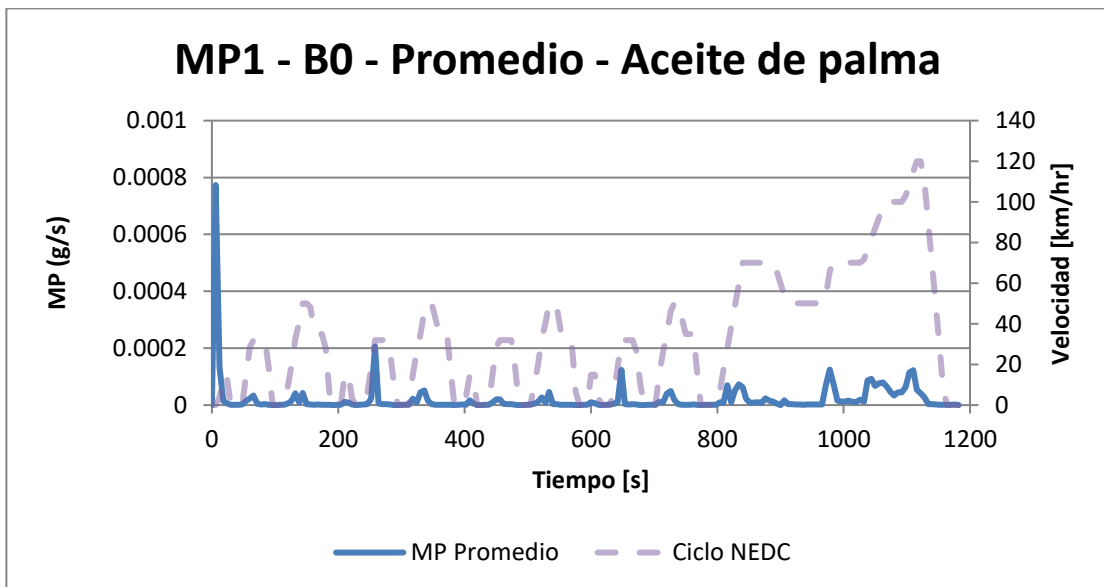
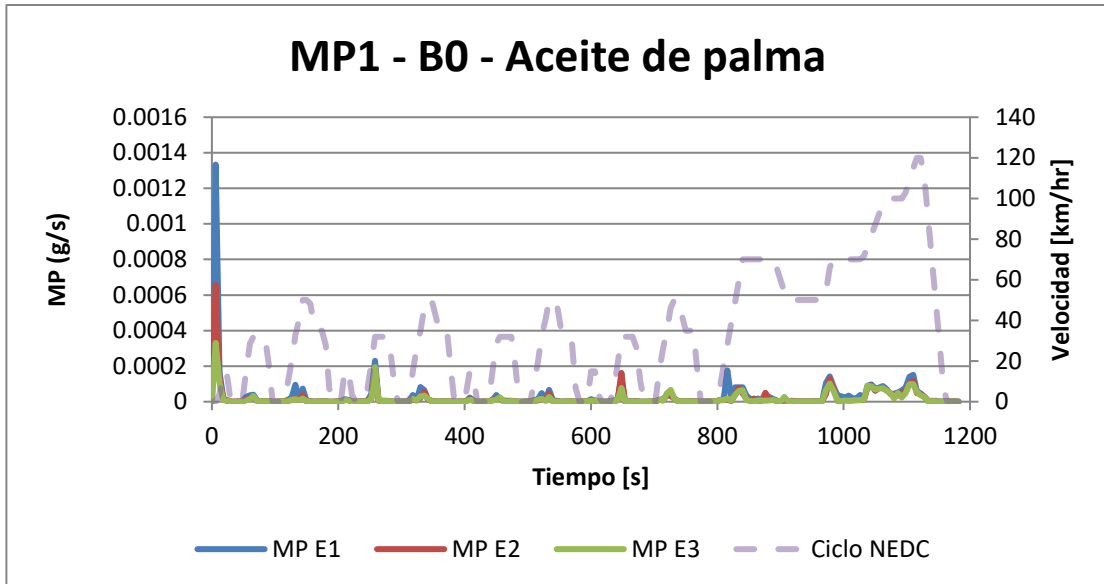
MP2.5 - B20 - Acumulado Promedio - Aceite de palma



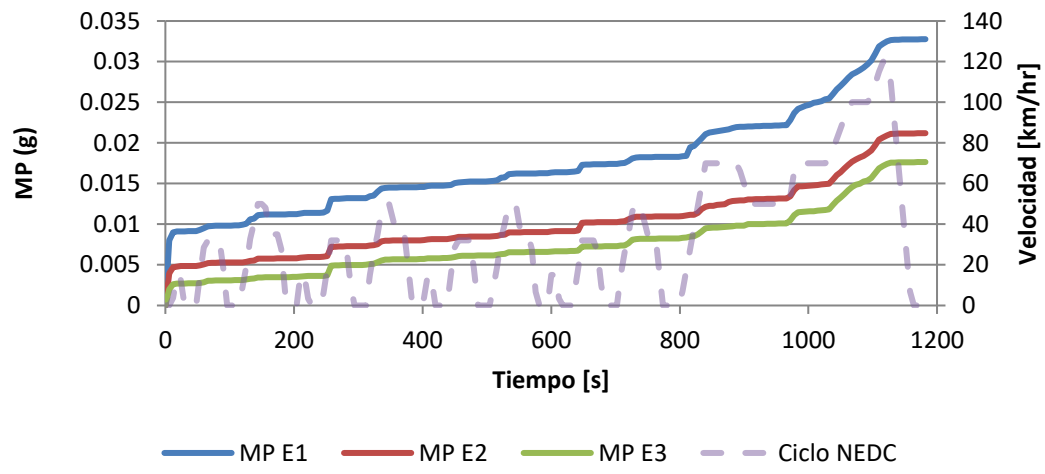




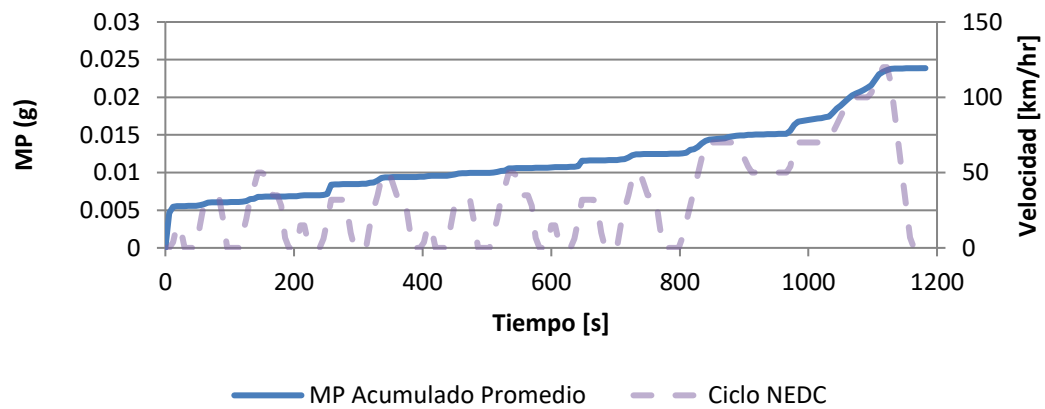
6.2.9 Aceite de palma, granulometría de 1 μm para distintas mezclas.

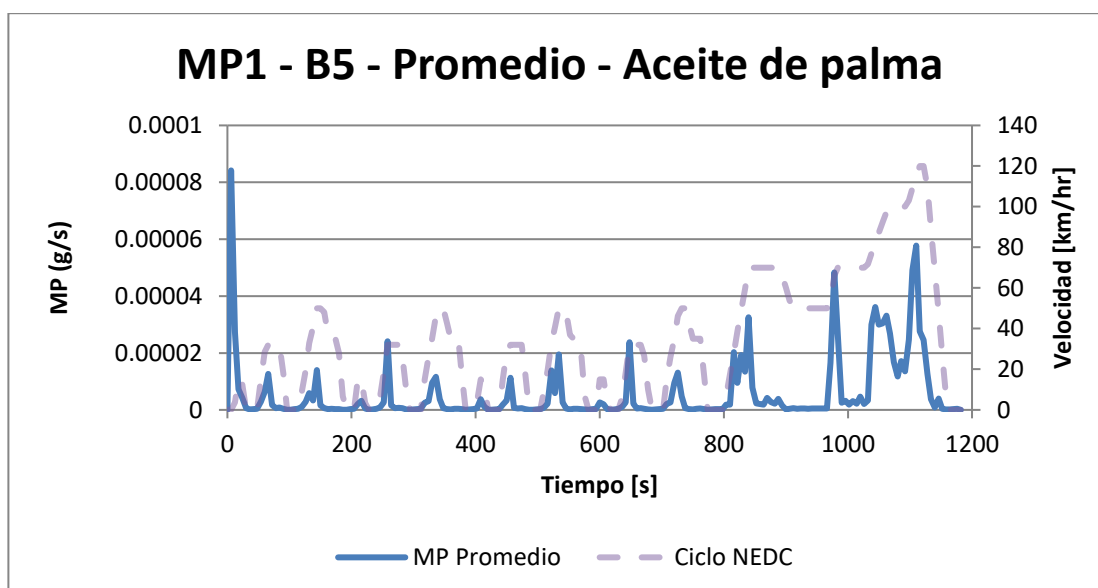
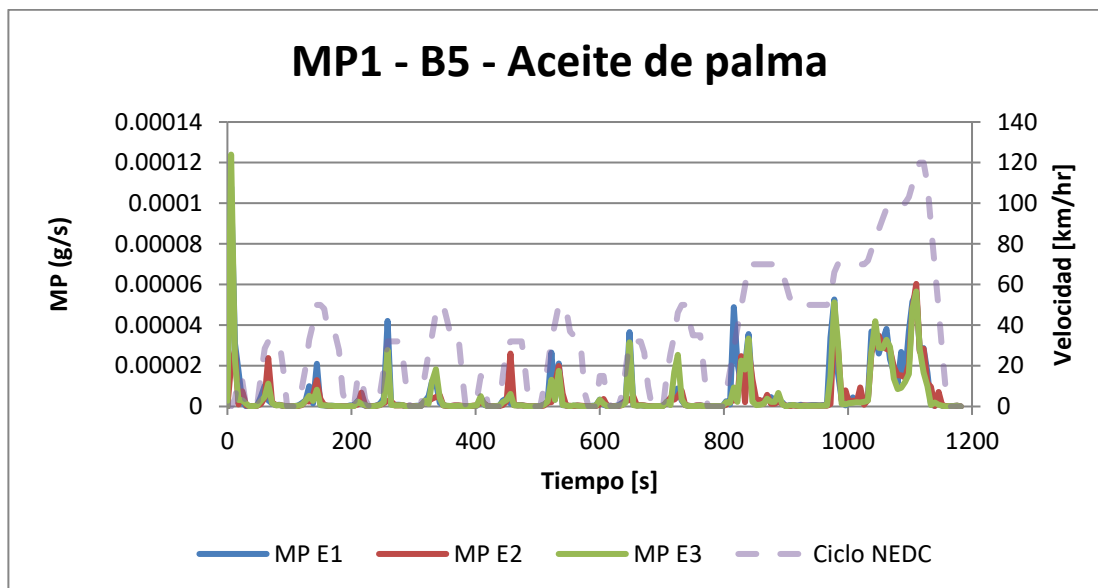


MP1 - B0 -Acumulado - Aceite de palma

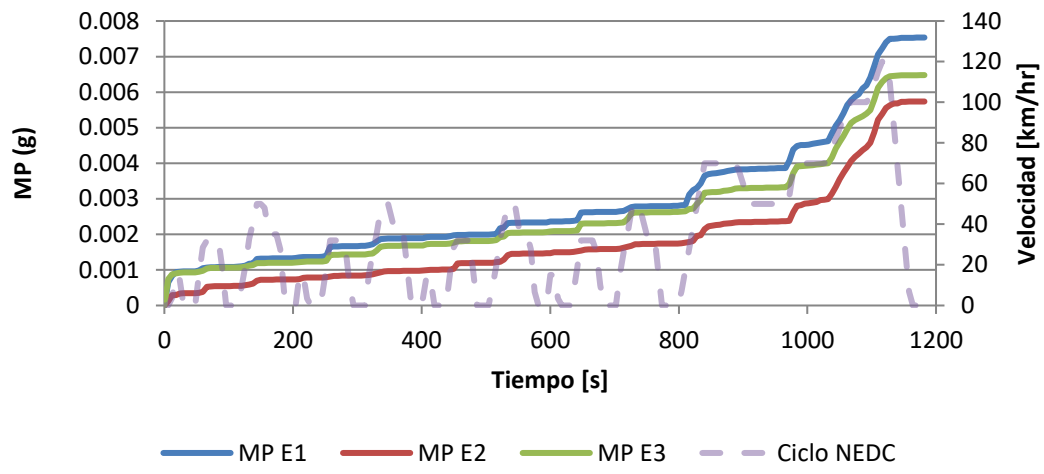


MP1 - B0 - Acumulado Promedio - Aceite de palma

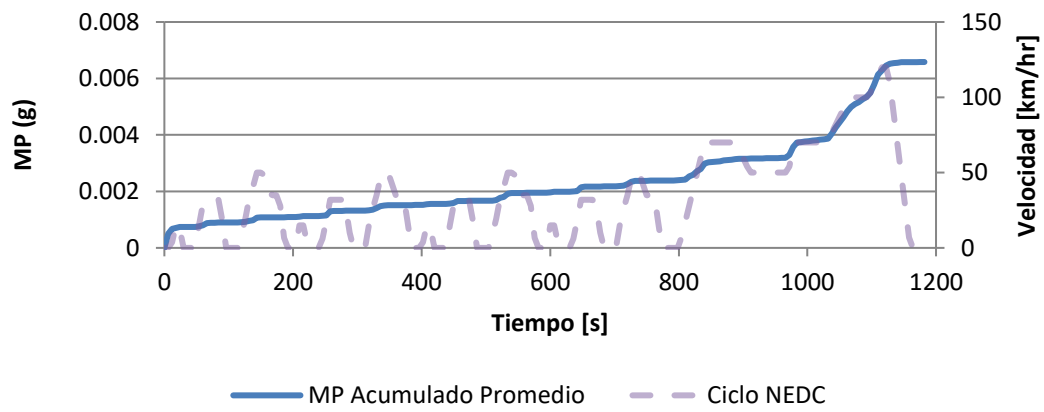


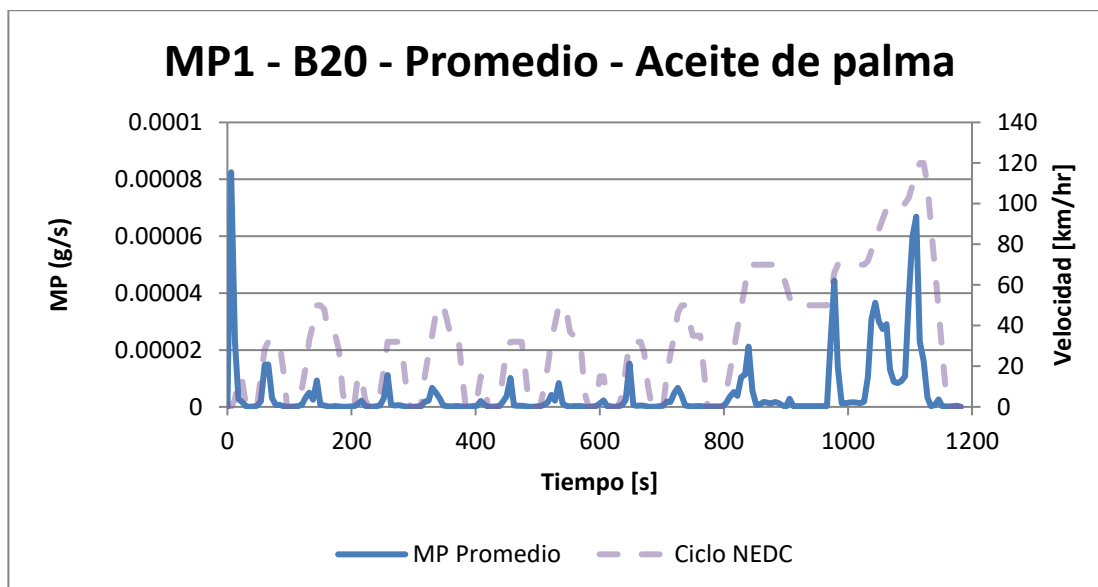
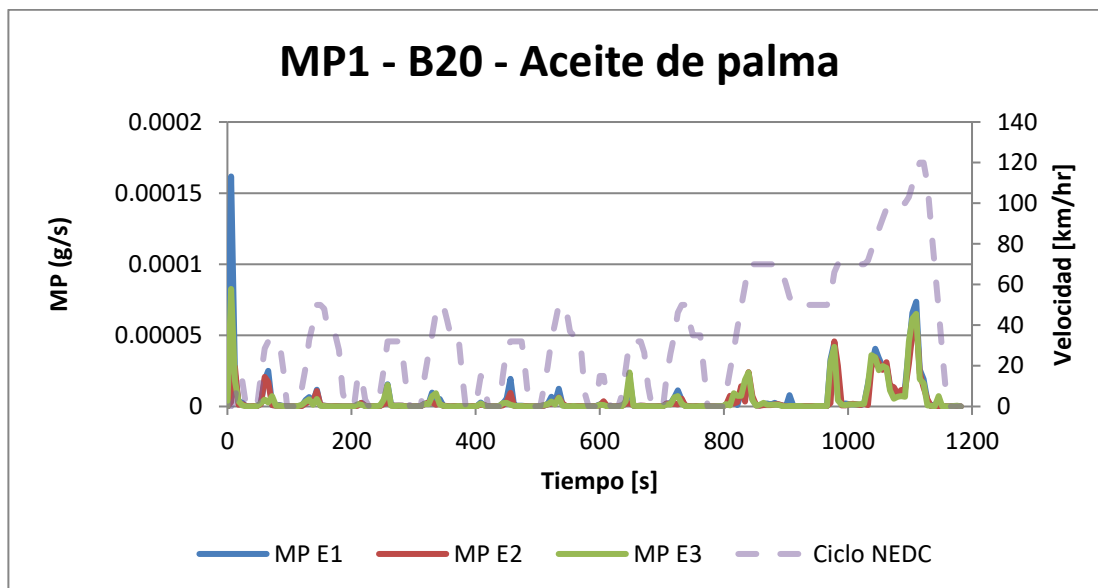


MP1 - B5 -Acumulado - Aceite de palma

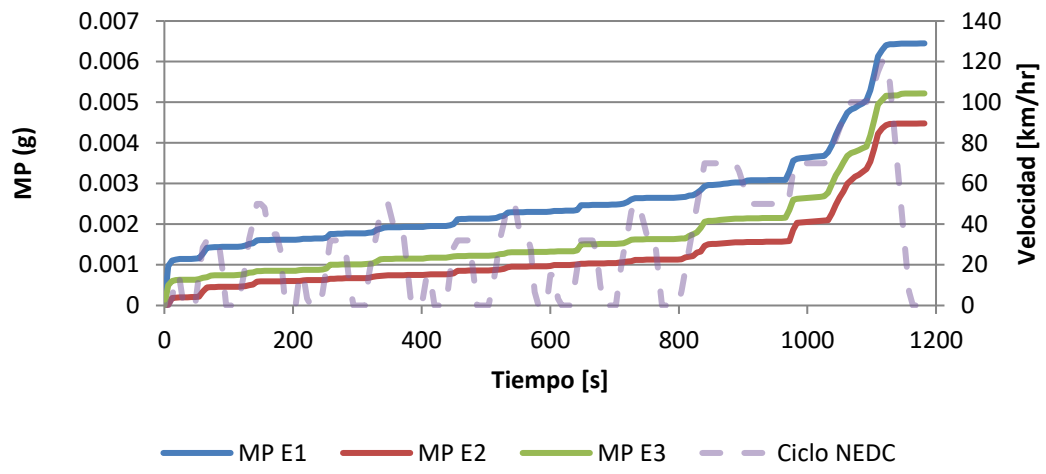


MP1 - B5 - Acumulado Promedio - Aceite de palma

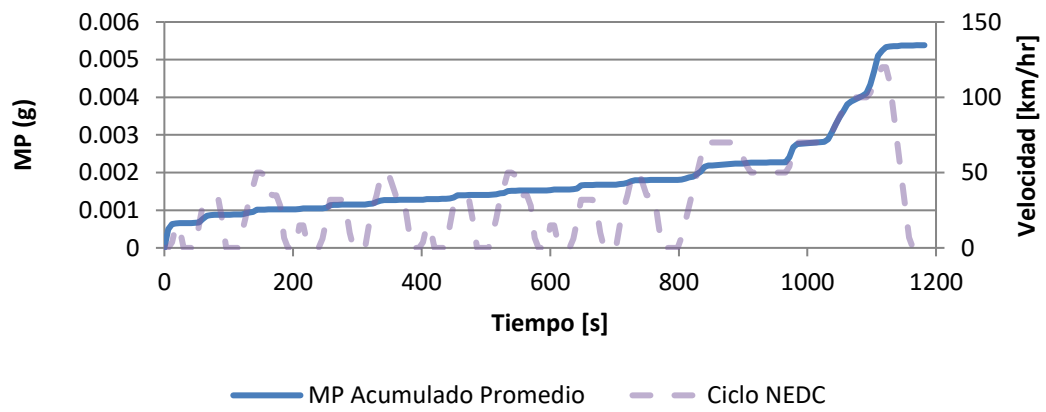




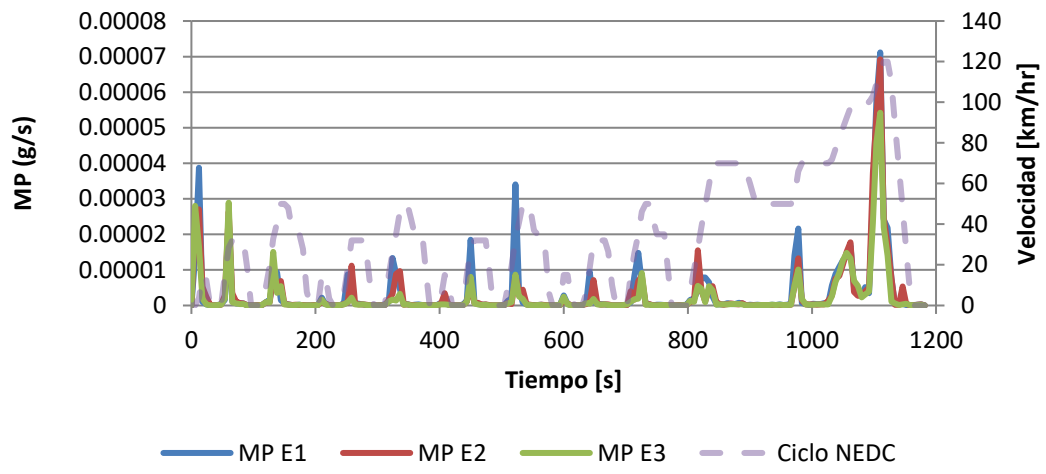
MP1 - B20 -Acumulado - Aceite de palma



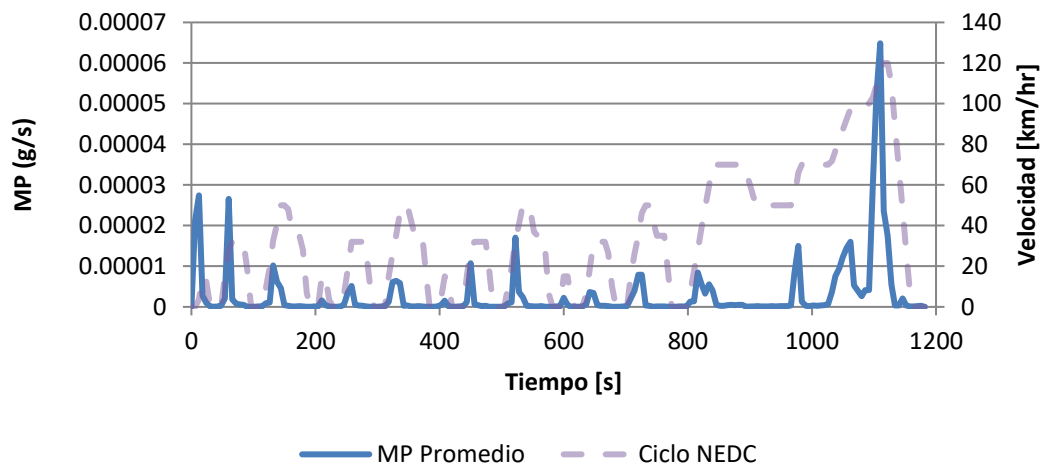
MP1 - B20 - Acumulado Promedio - Aceite de palma

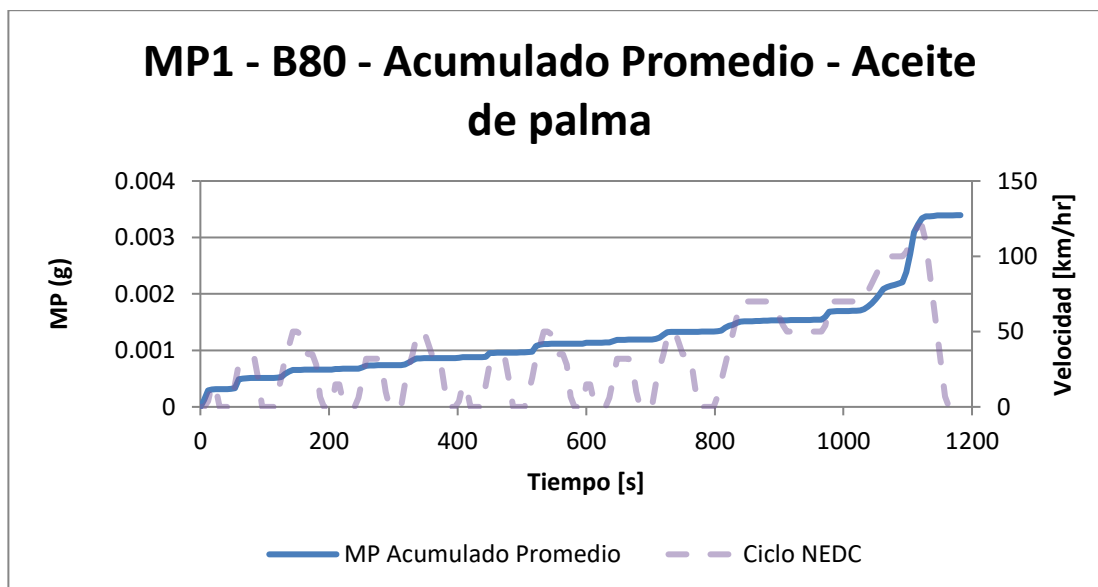
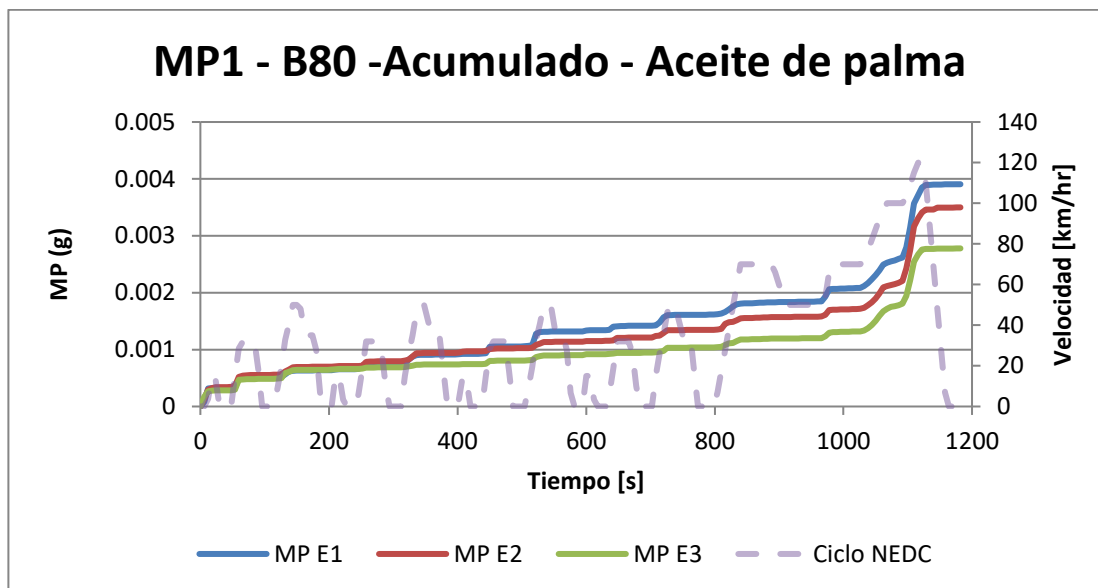


MP1 - B80 - Aceite de palma

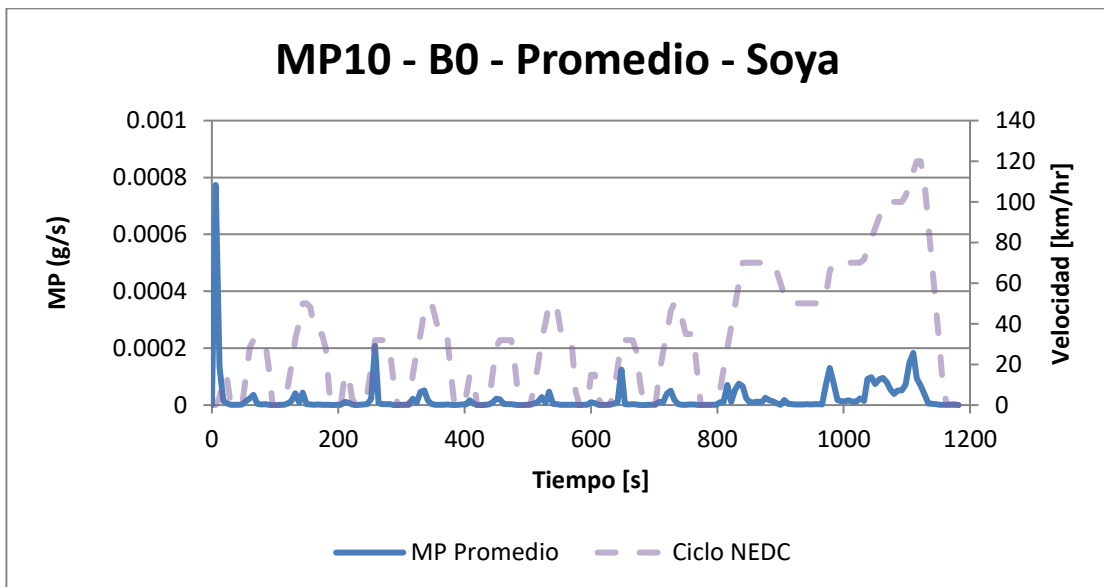
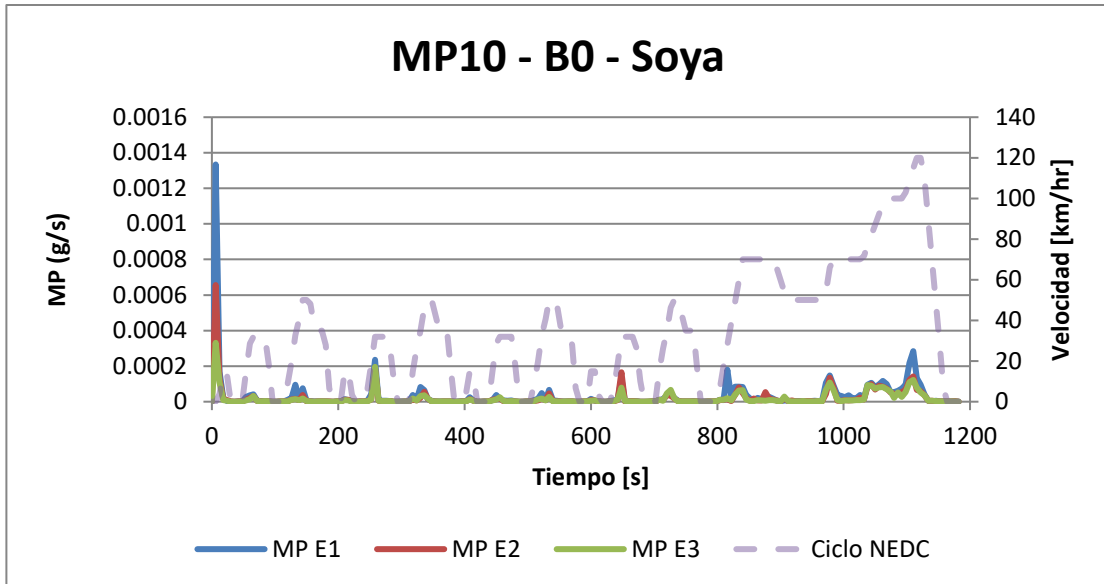


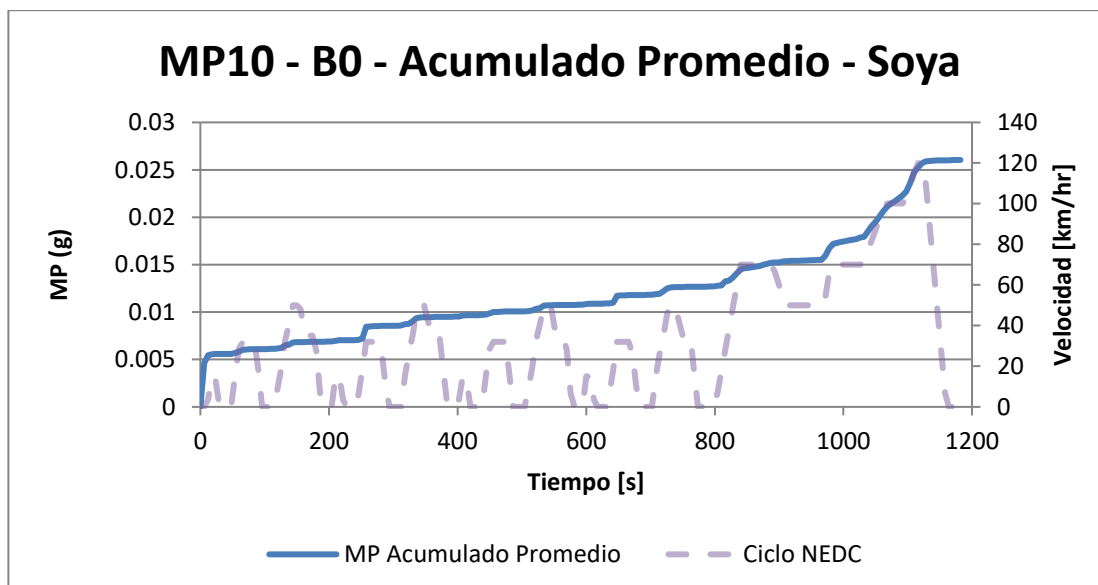
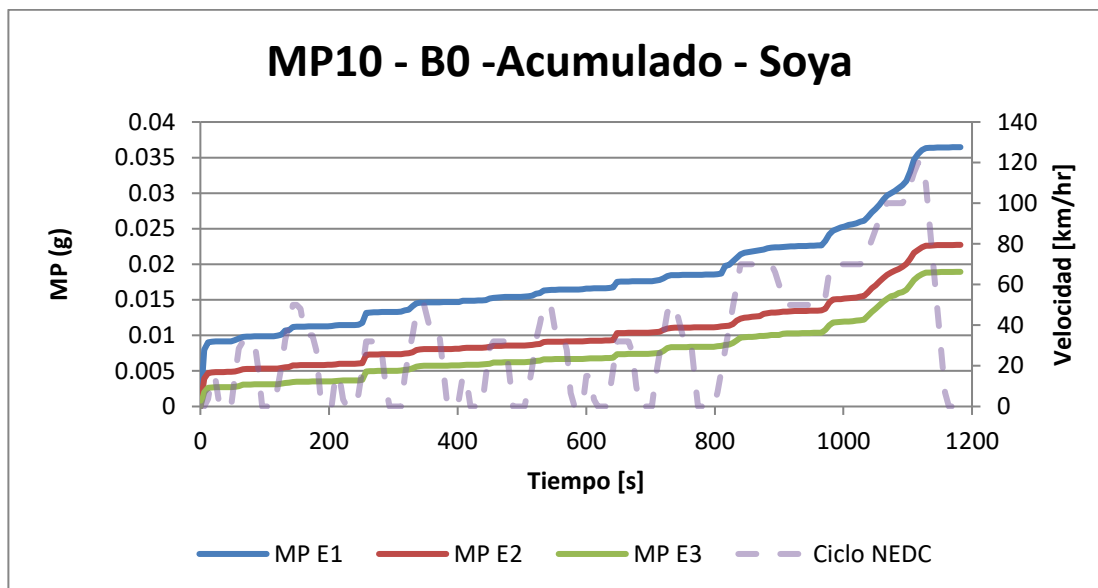
MP1 - B80 - Promedio - Aceite de palma



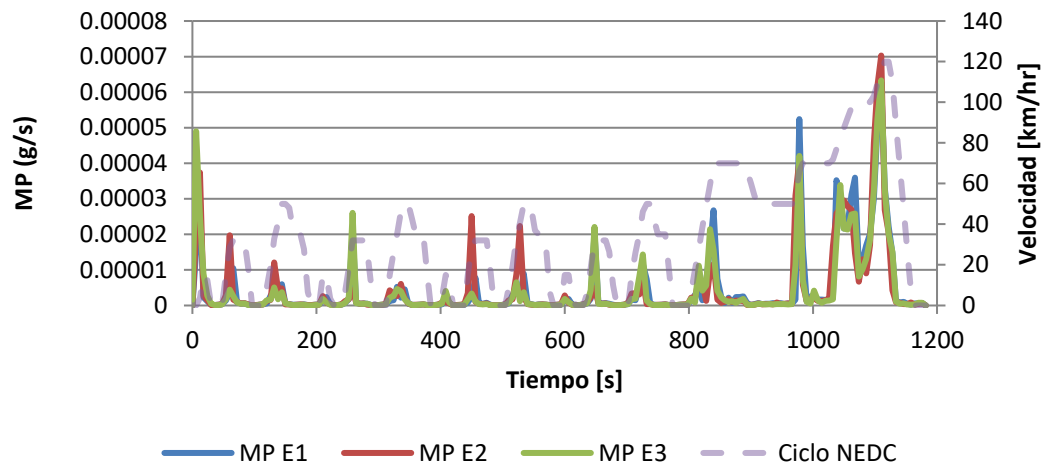


6.2.10 Aceite de soya, granulometría de 10 μm para distintas mezclas.

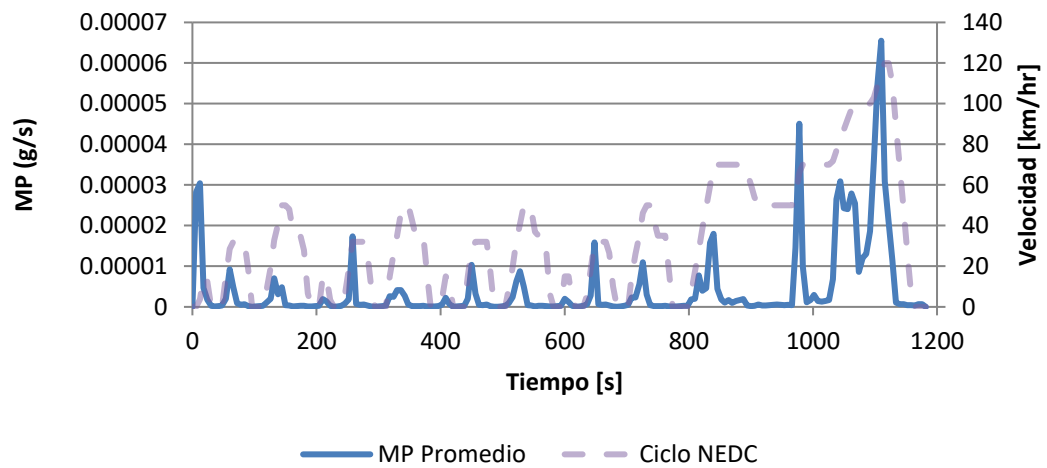


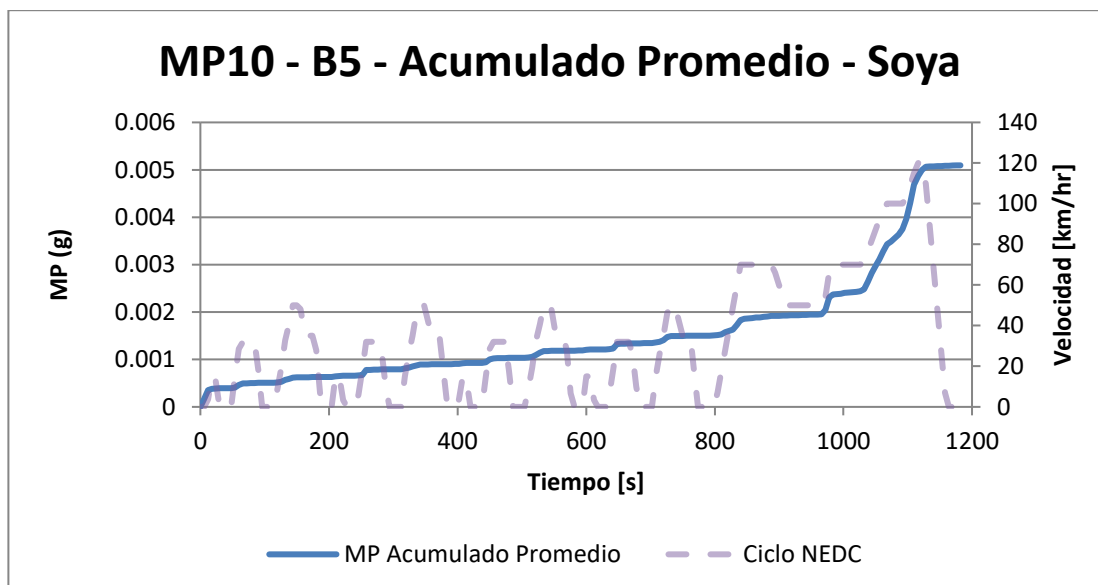
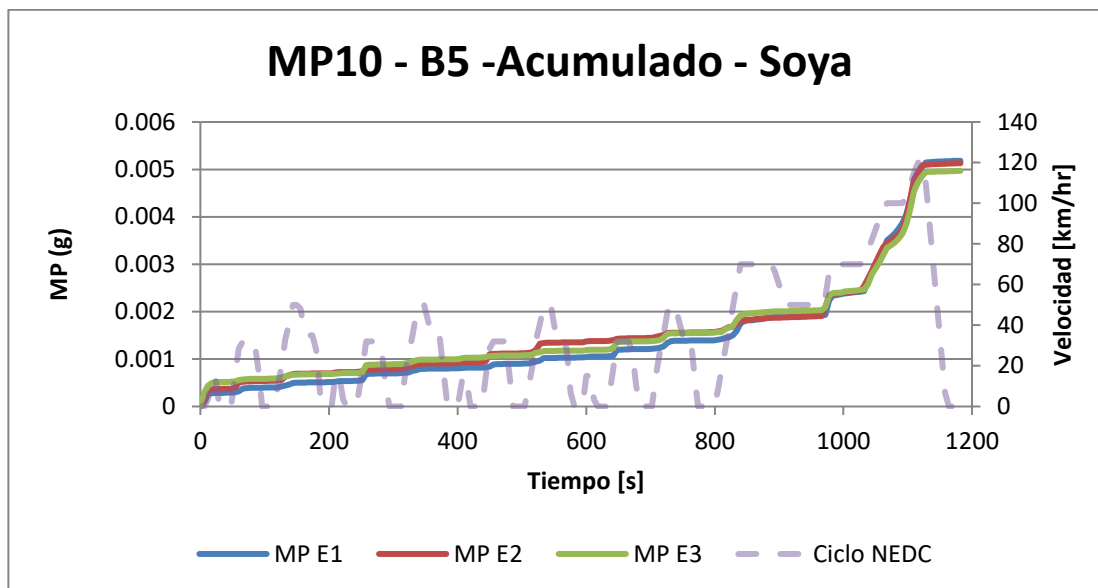


MP10 - B5 - Soya

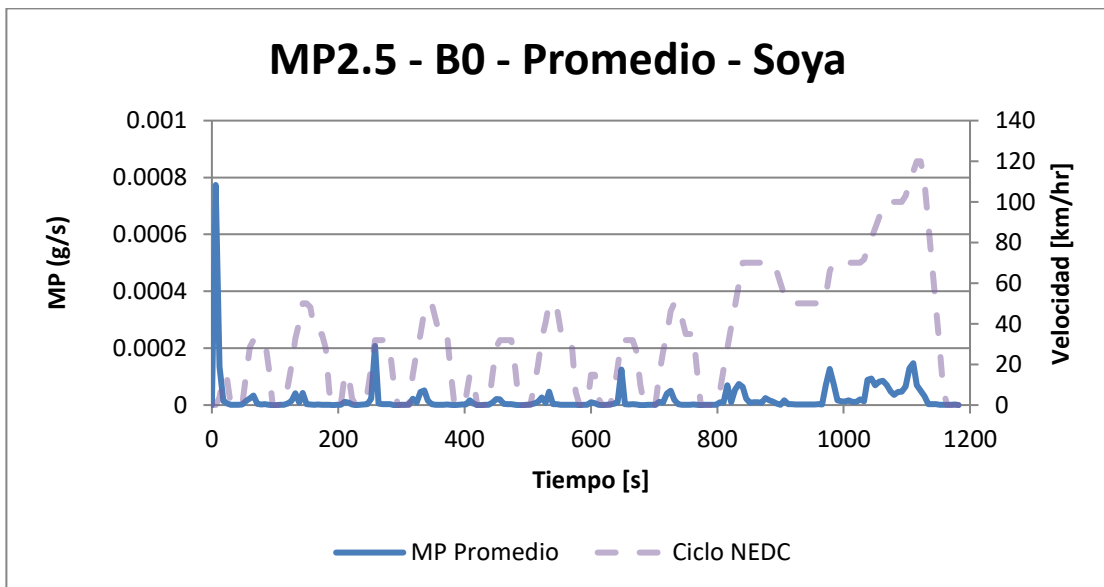
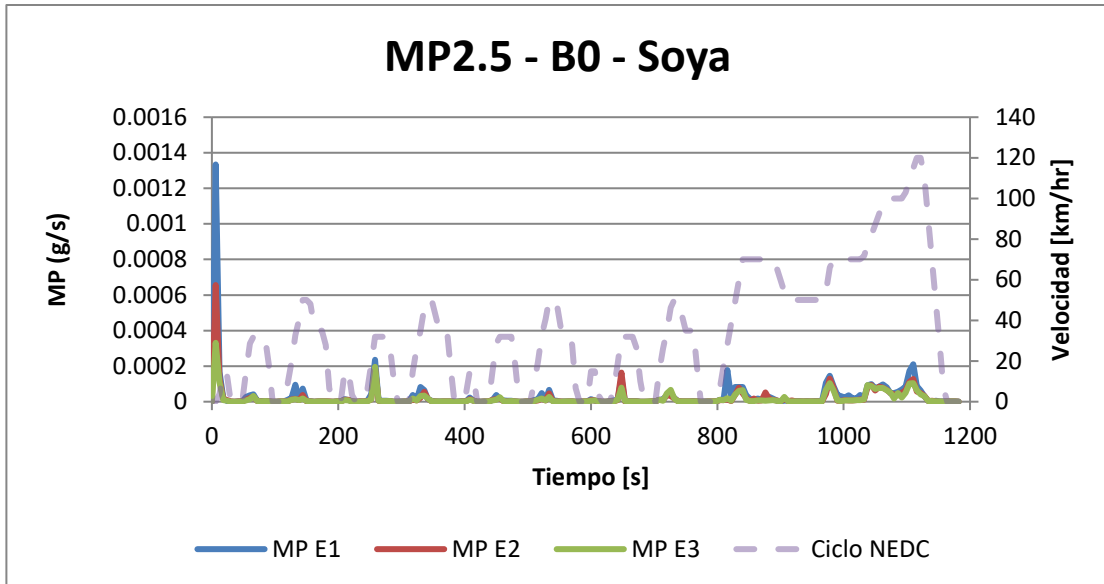


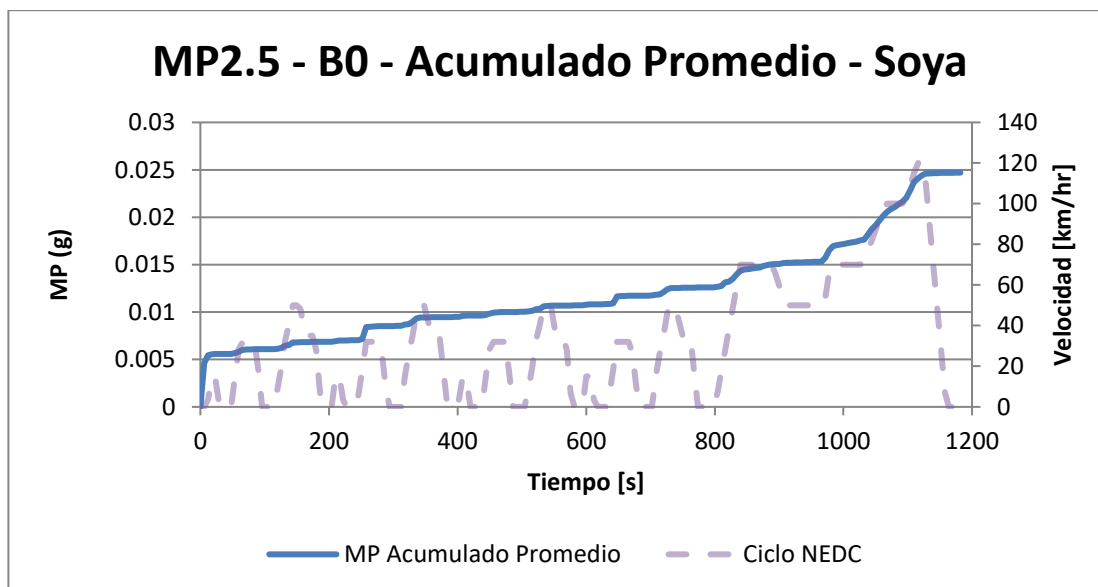
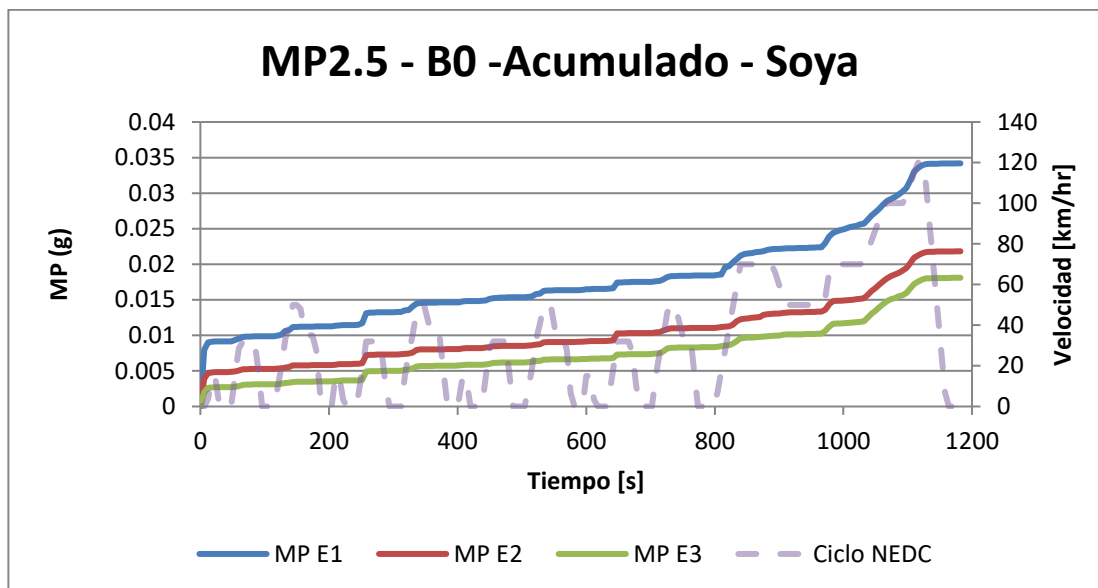
MP10 - B5 - Promedio - Soya

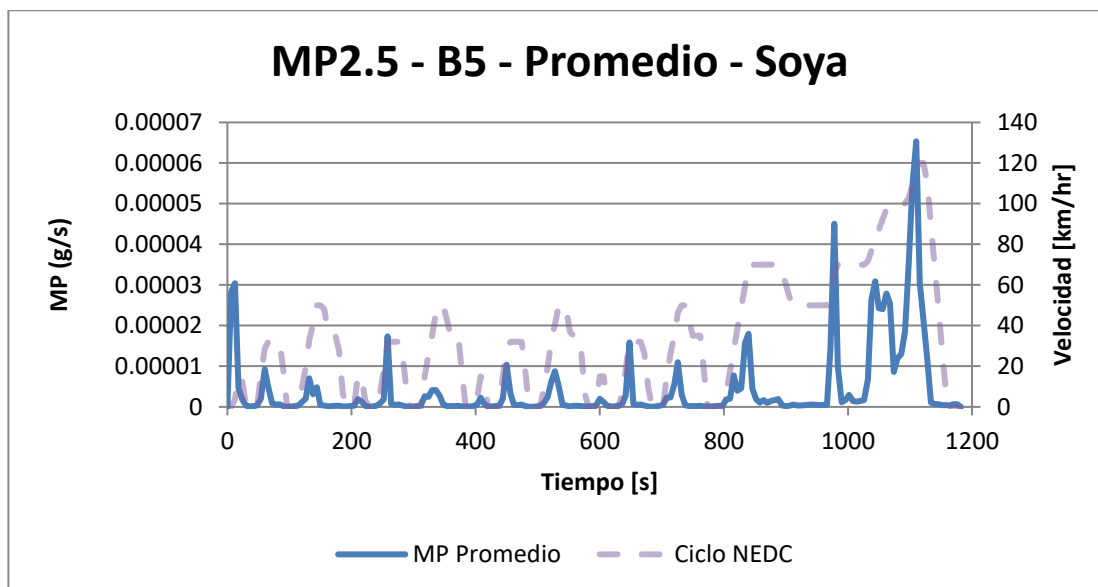
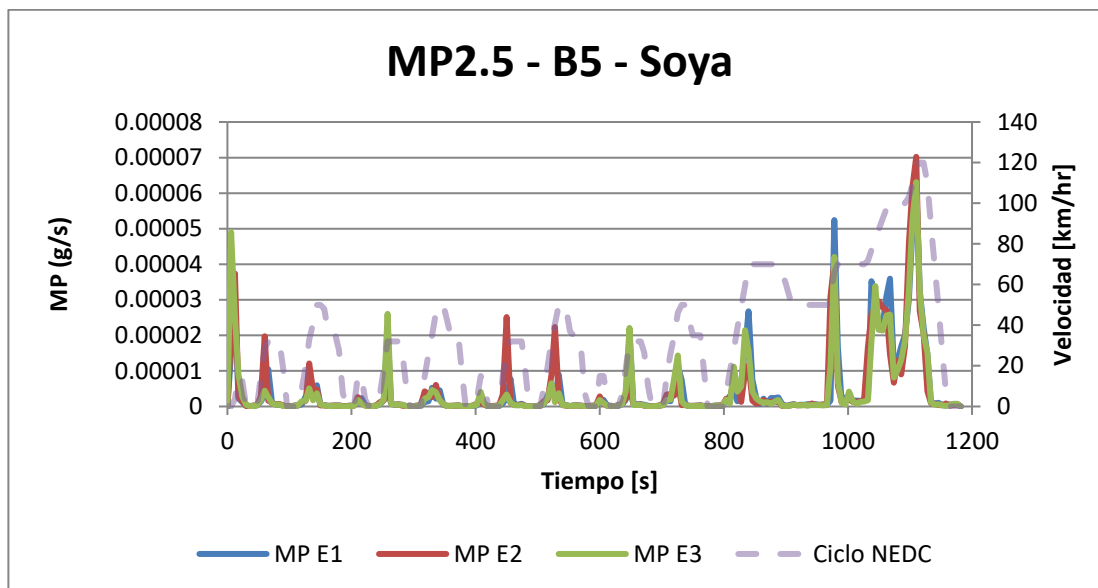


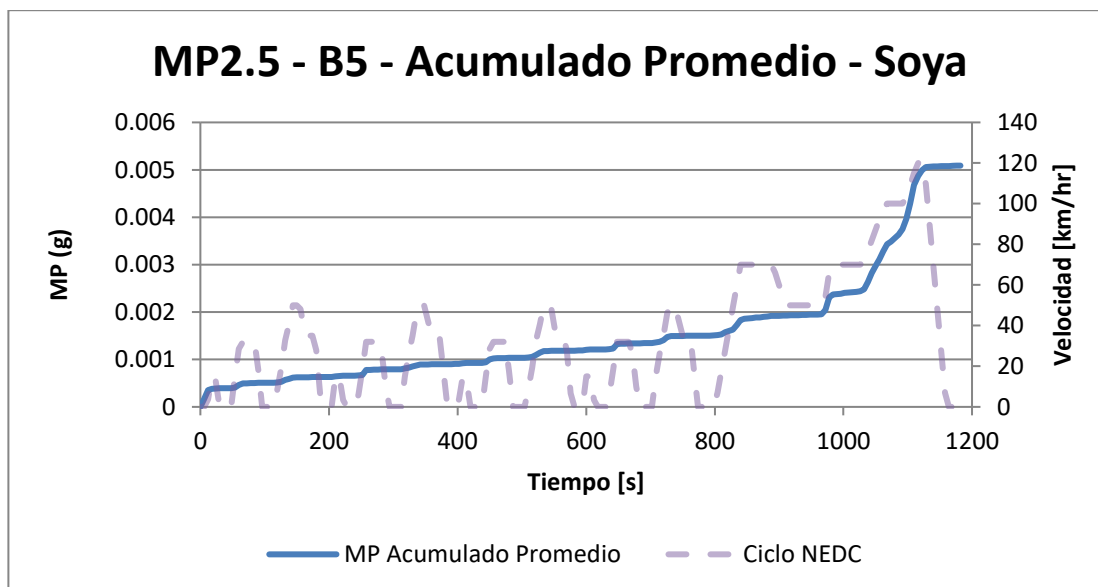
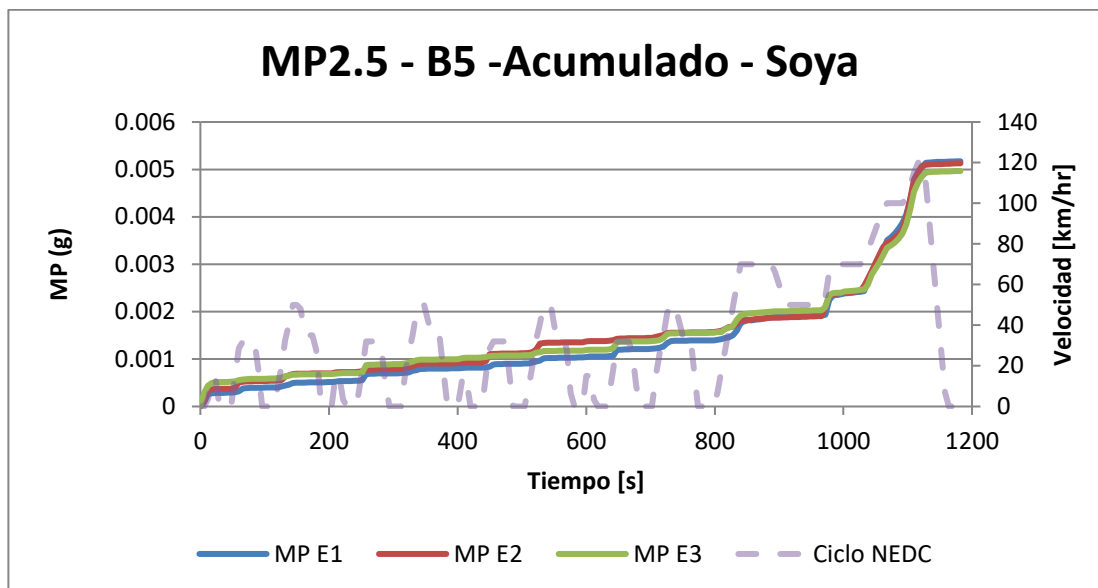


6.2.11 Aceite de soya, granulometría de 2.5 μm para distintas mezclas.

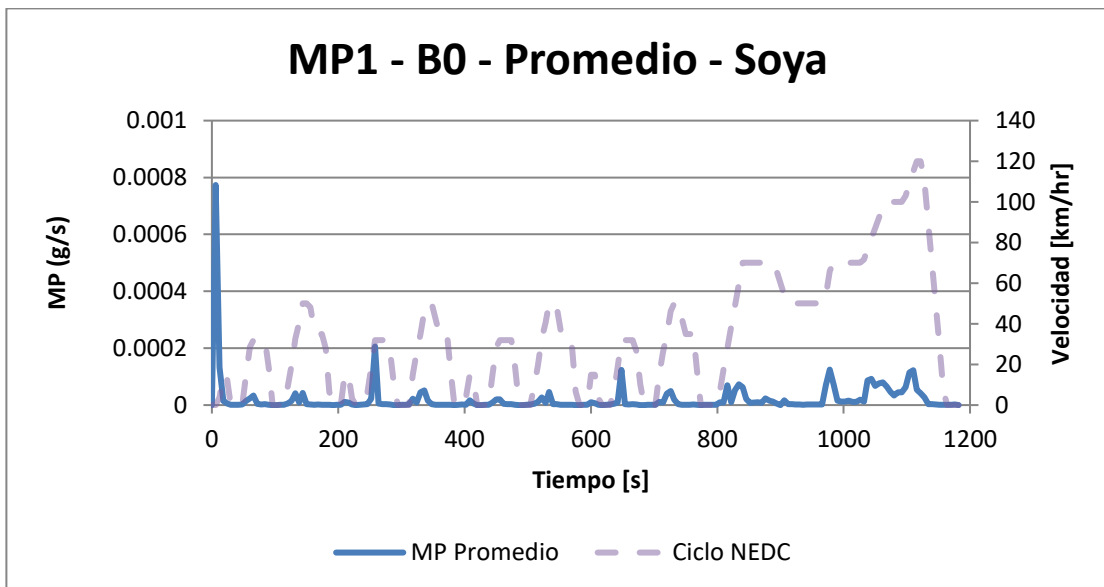
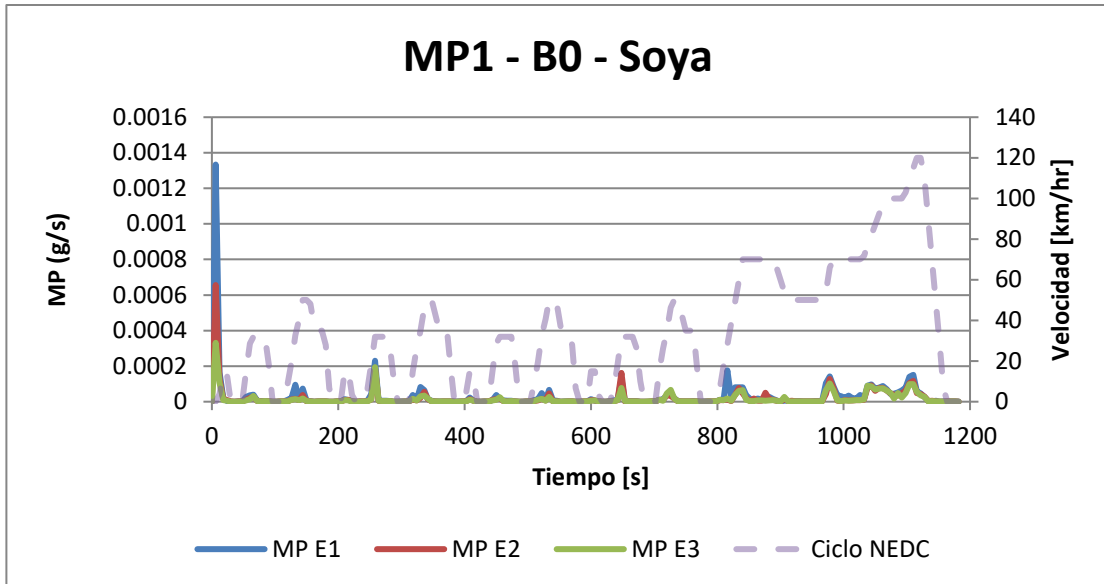


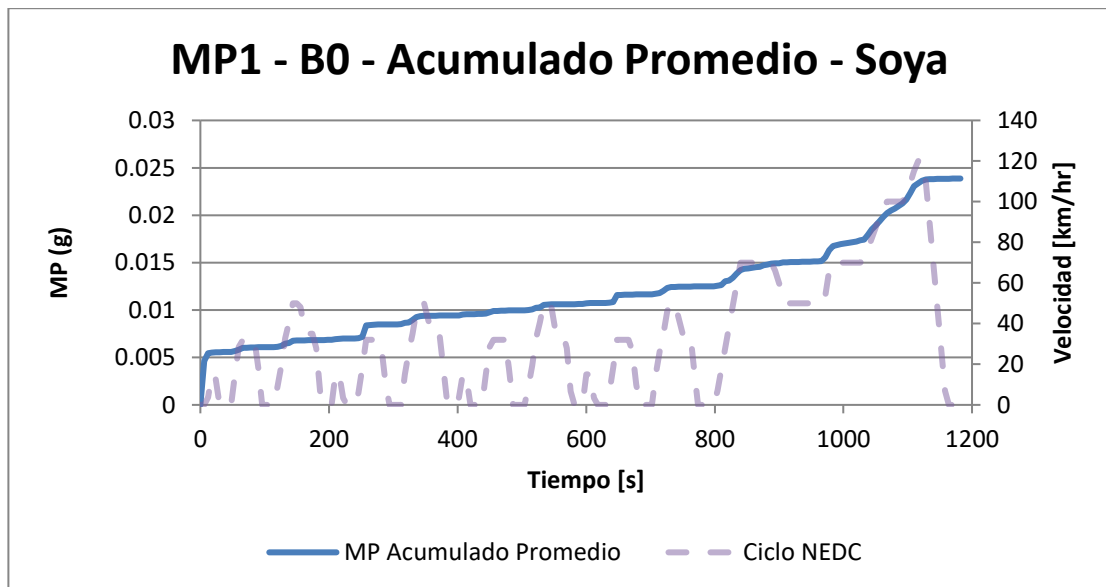
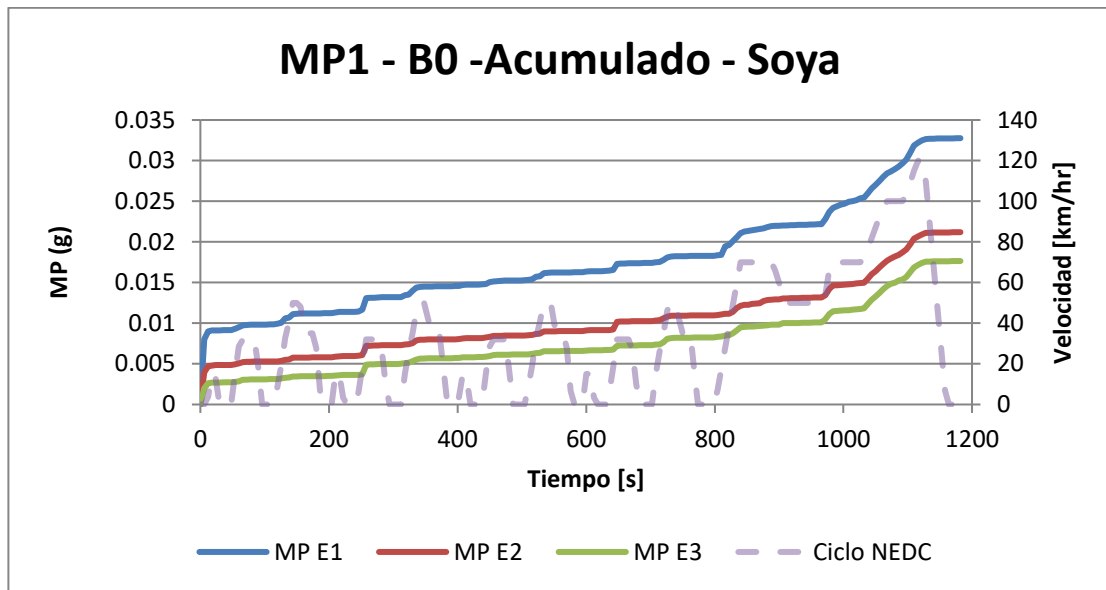


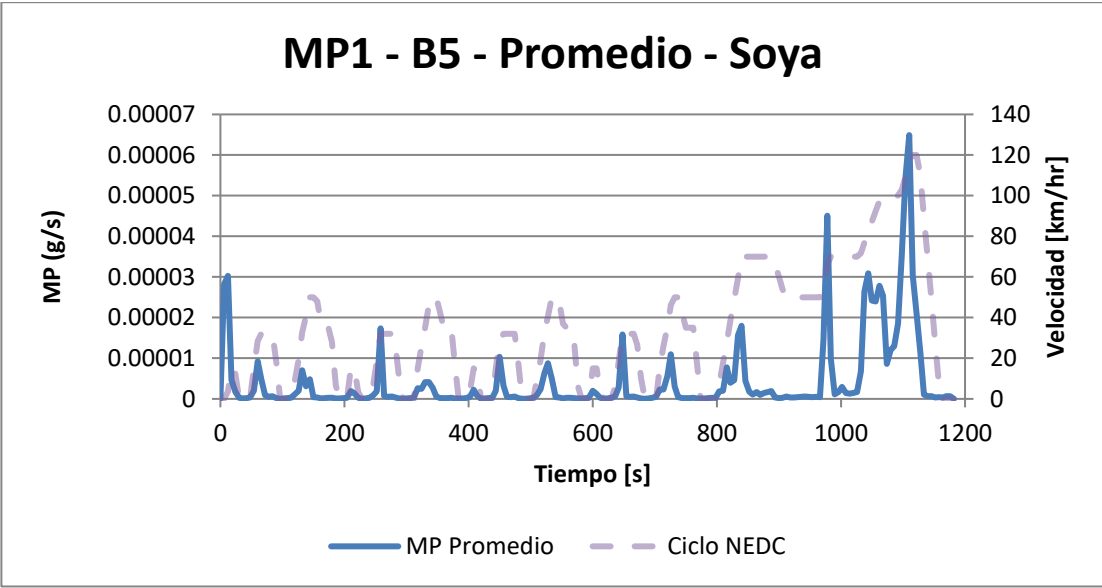
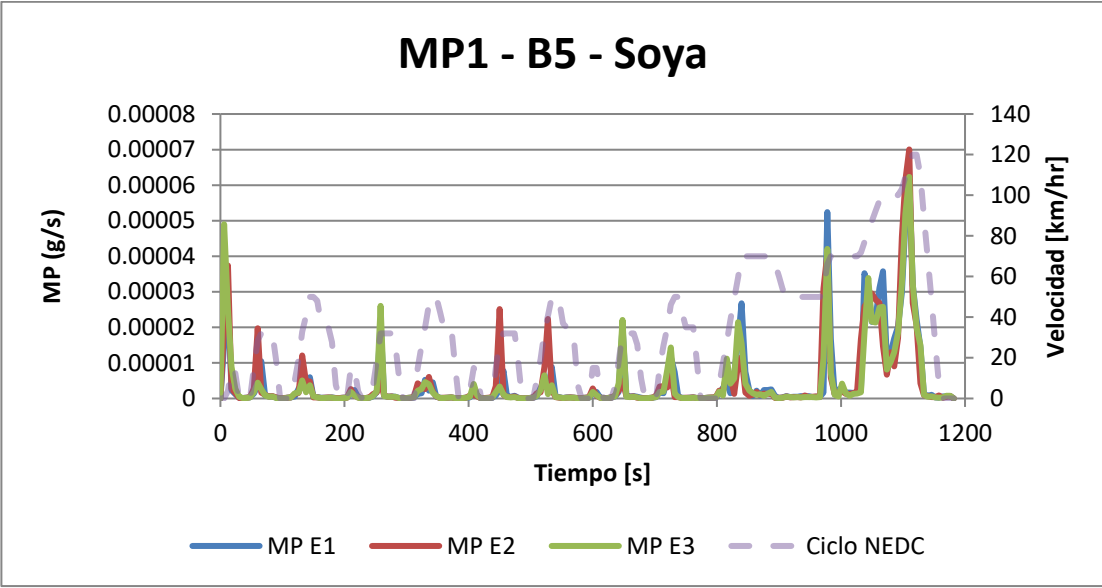


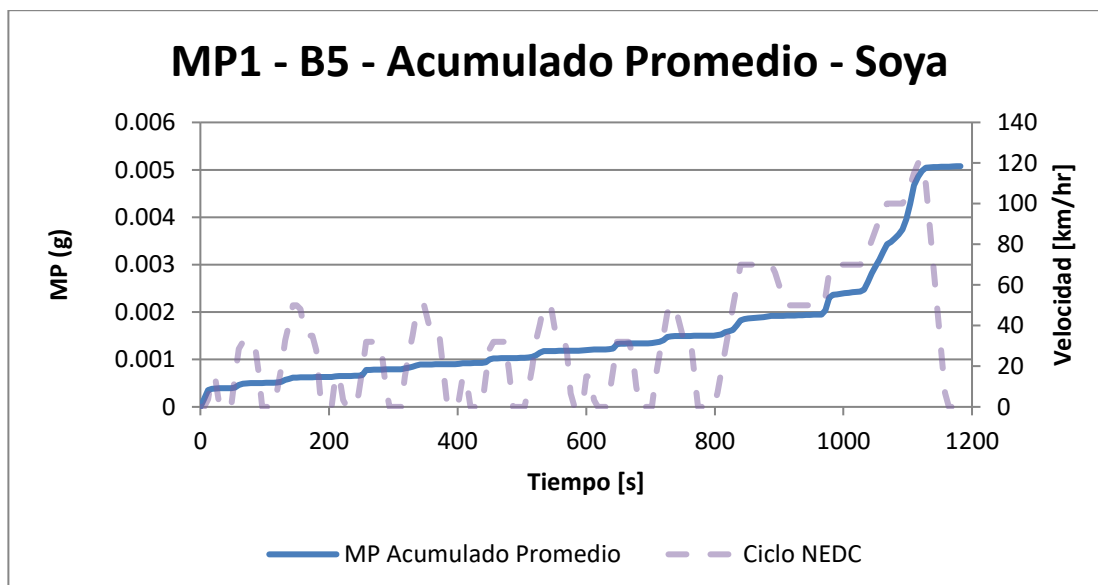
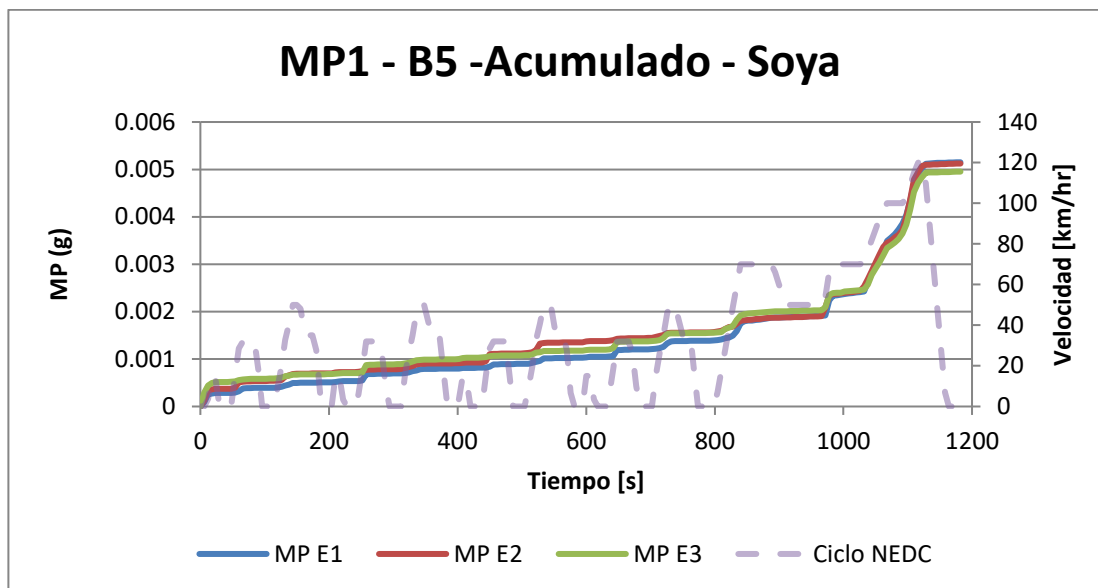


6.2.12 Aceite de soya, granulometría de 1 μm para distintas mezclas.





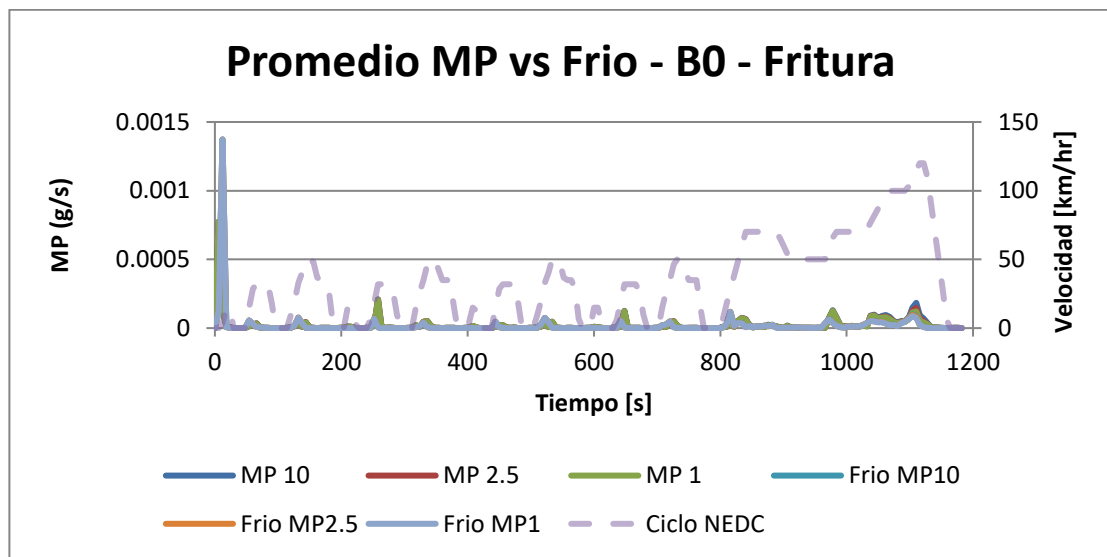


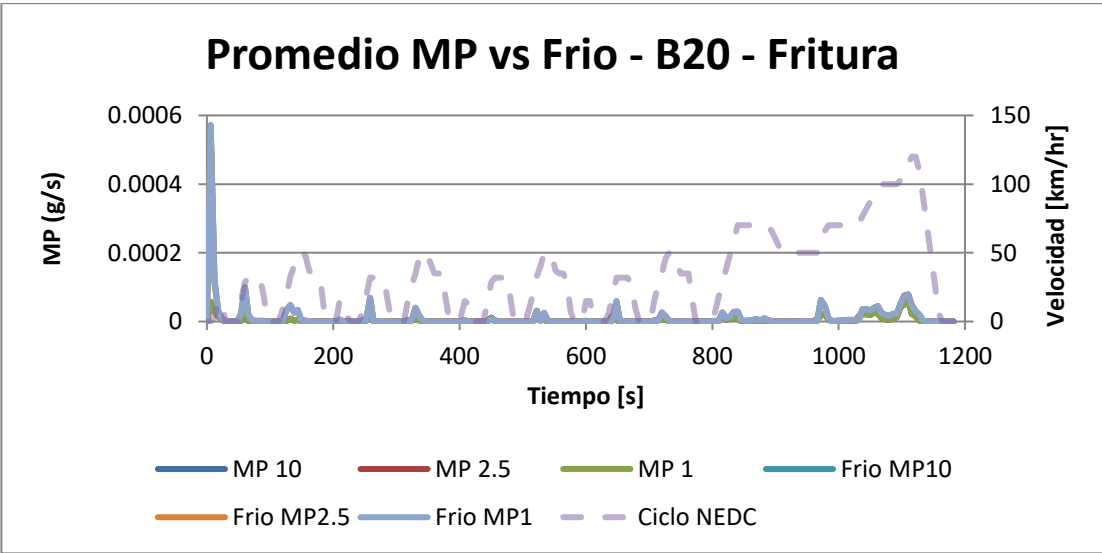
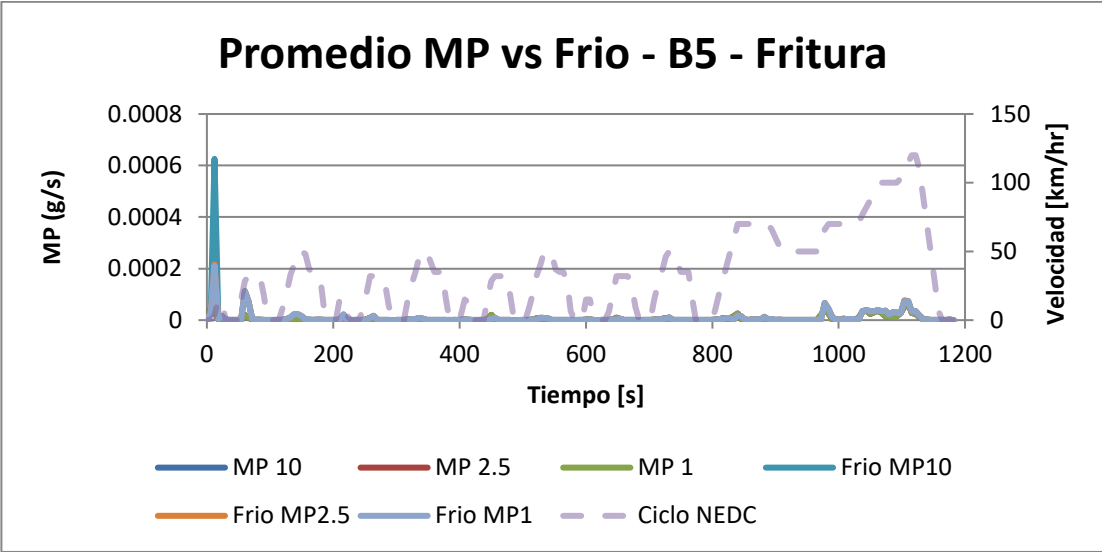


6.3 Anexo C – Comparación granulométrica partida en frio vs. promedio emisiones MP en transiente.

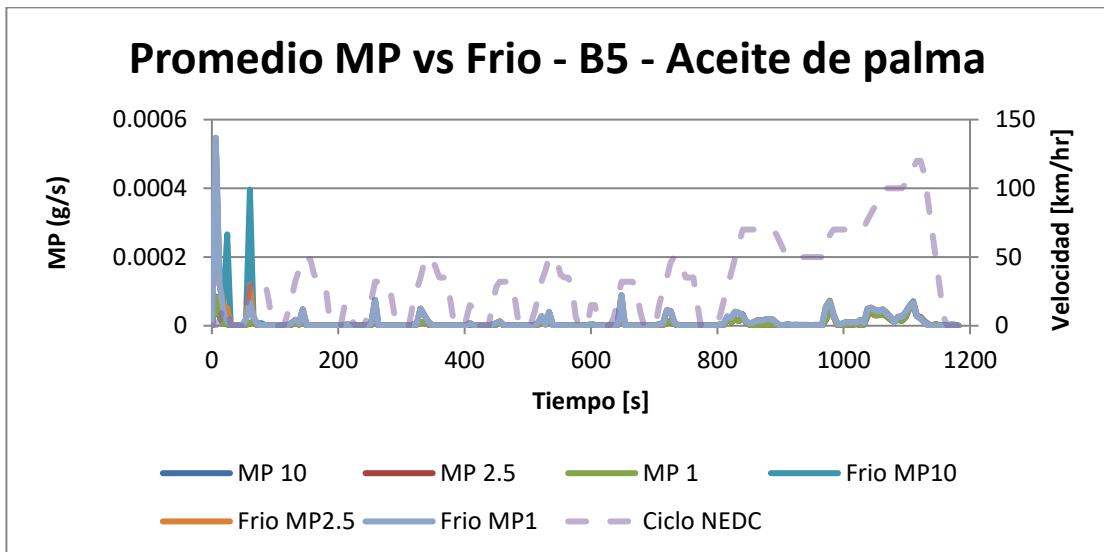
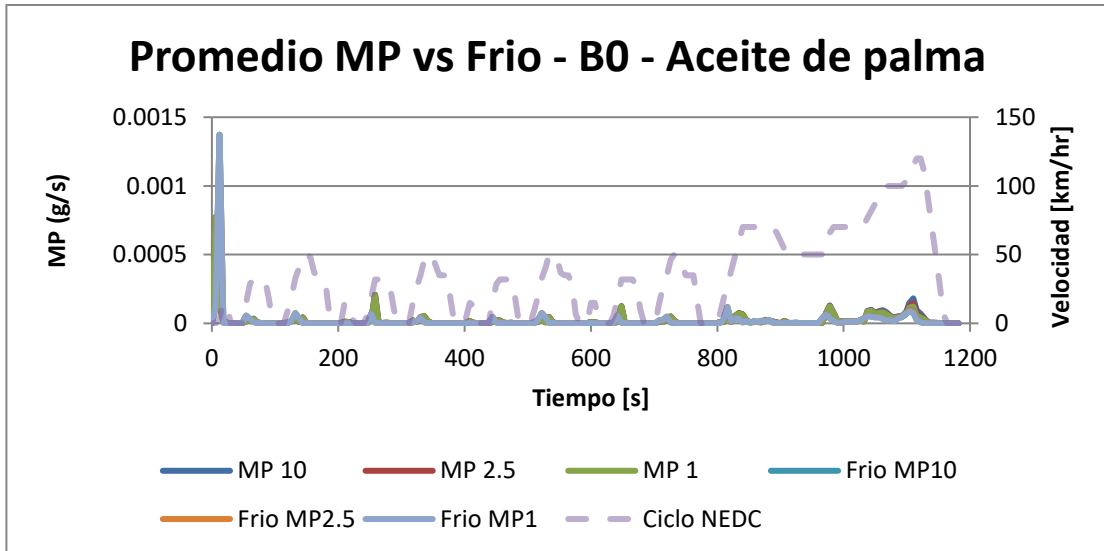
Comparación granulométrica de las partidas en frio y los promedios de las emisiones de MP para distintas mezclas.

6.3.1 Aceite de fritura vs. partida en frio.

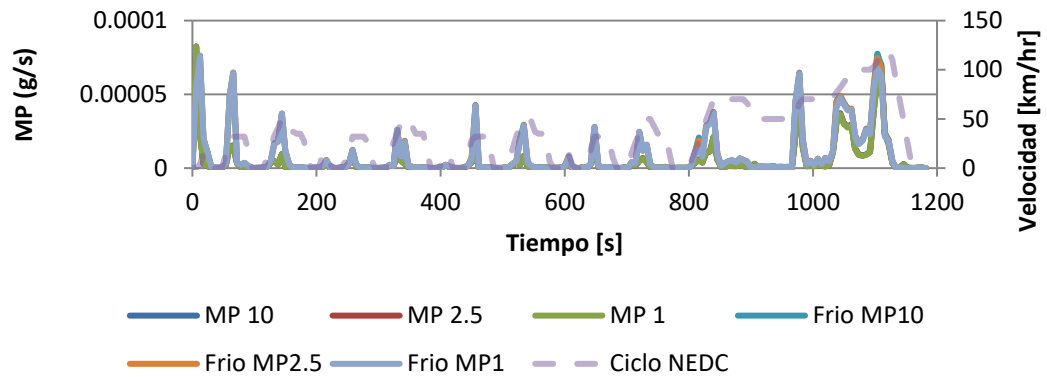




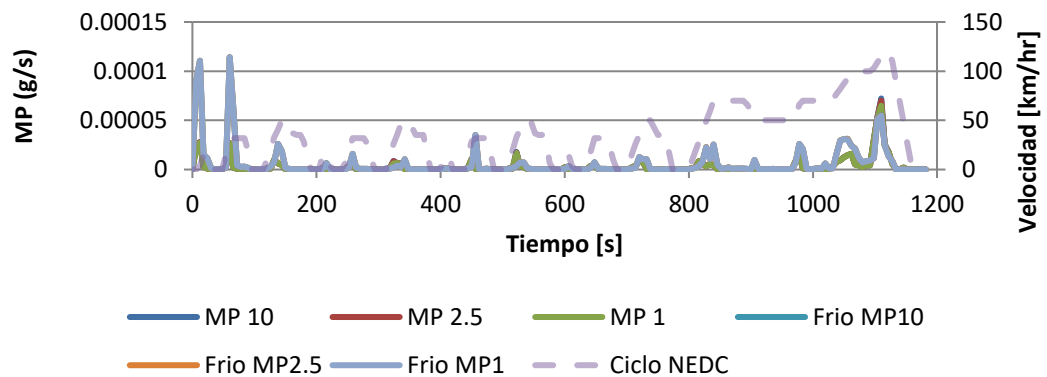
6.3.2 Aceite de palma vs. partida en frio.



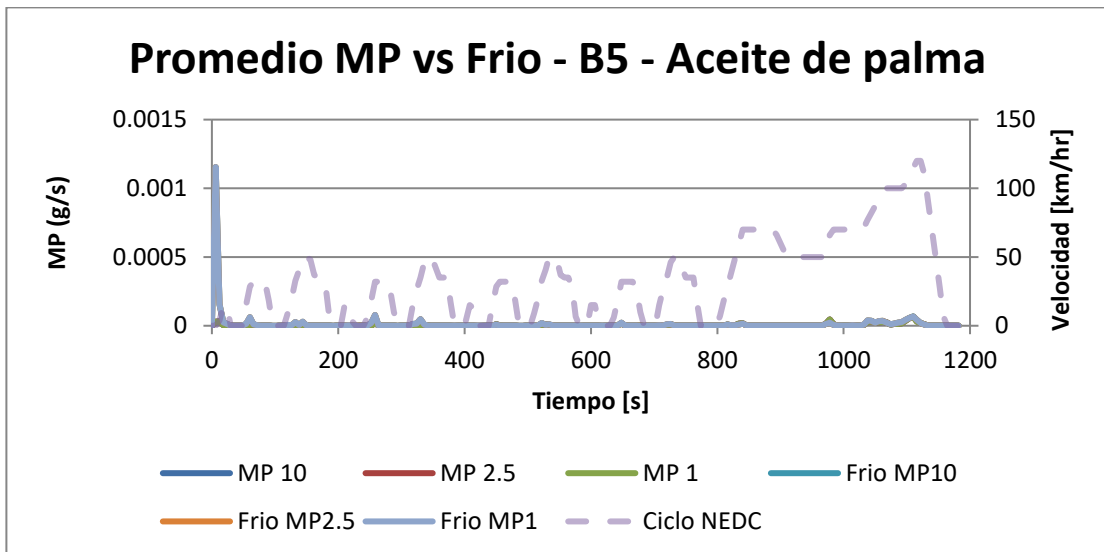
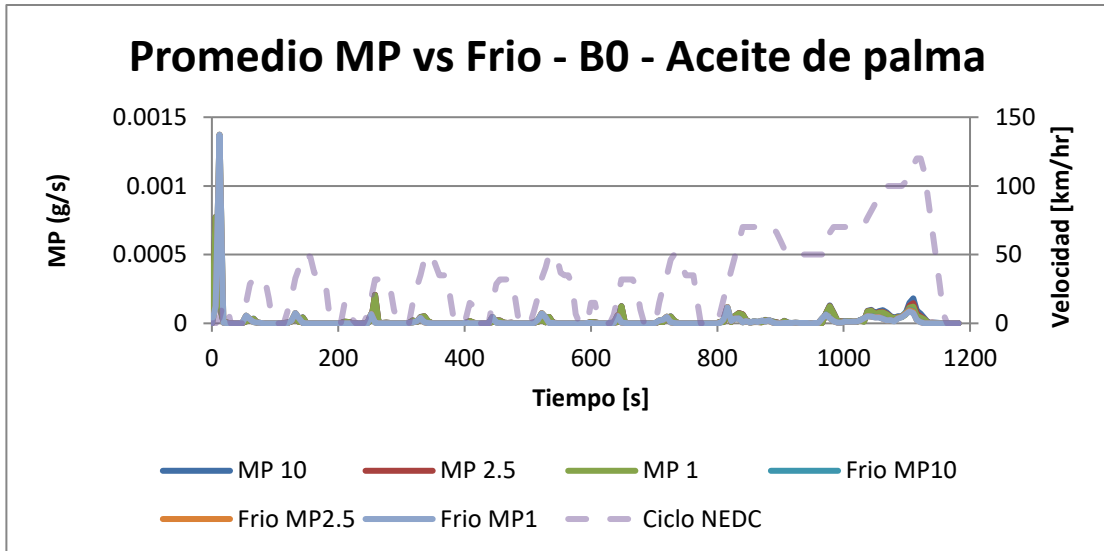
Promedio MP vs Frio - B20 - Aceite de palma



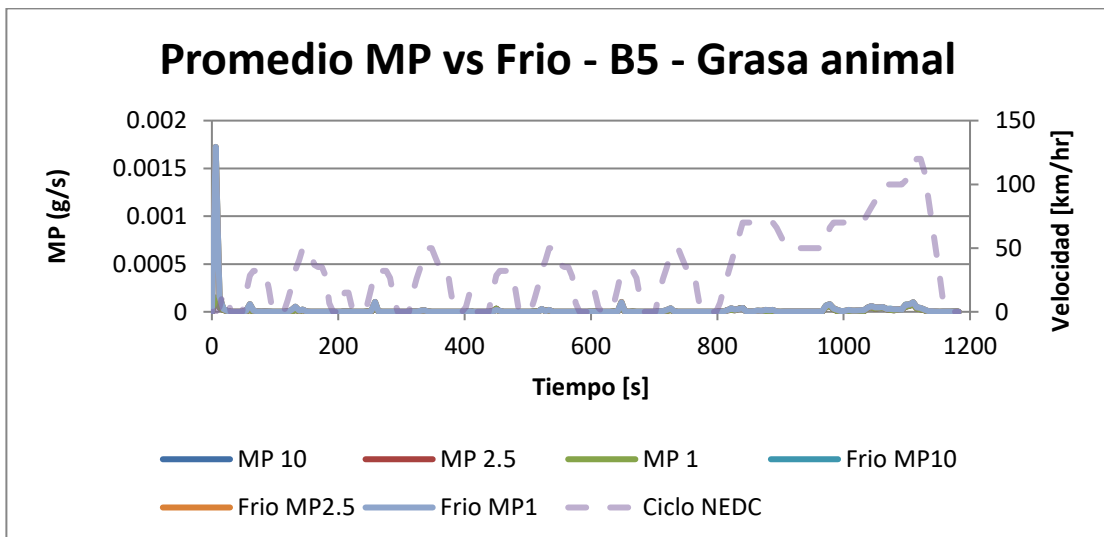
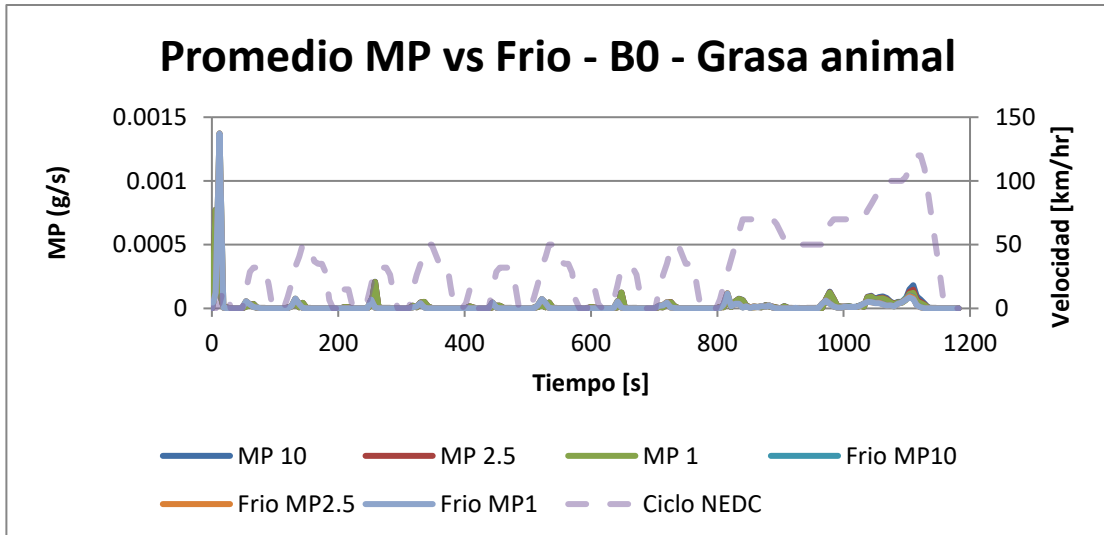
Promedio MP vs Frio - B80 - Aceite de palma



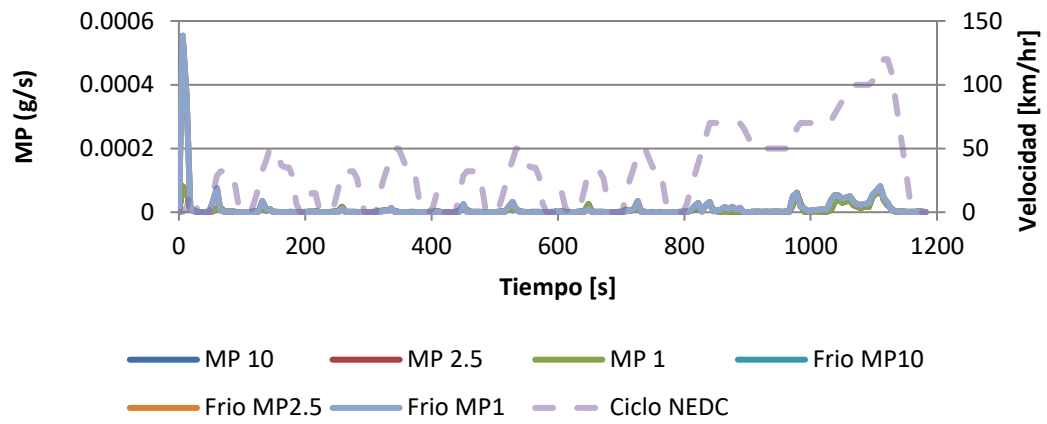
6.3.3 Aceite de soya vs. partida en frio.



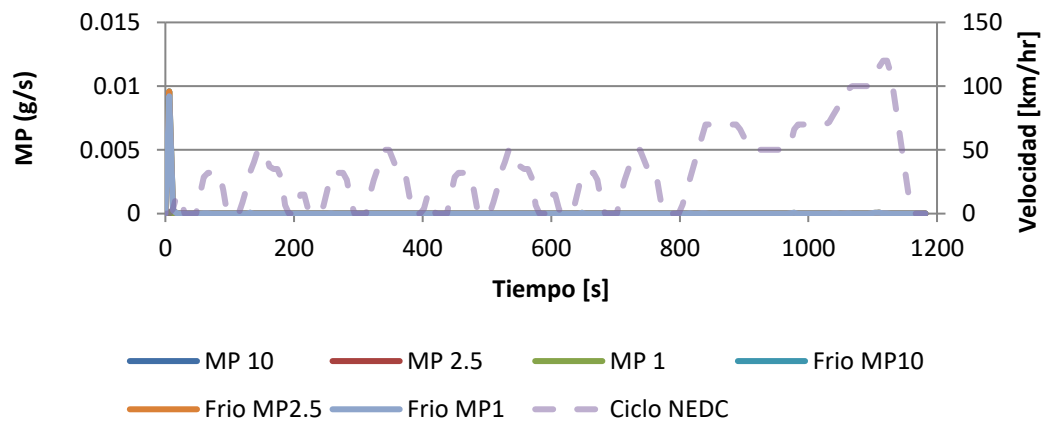
6.3.4 Grasa animal vs. partida en frio.



Promedio MP vs Frio - B20 - Grasa animal



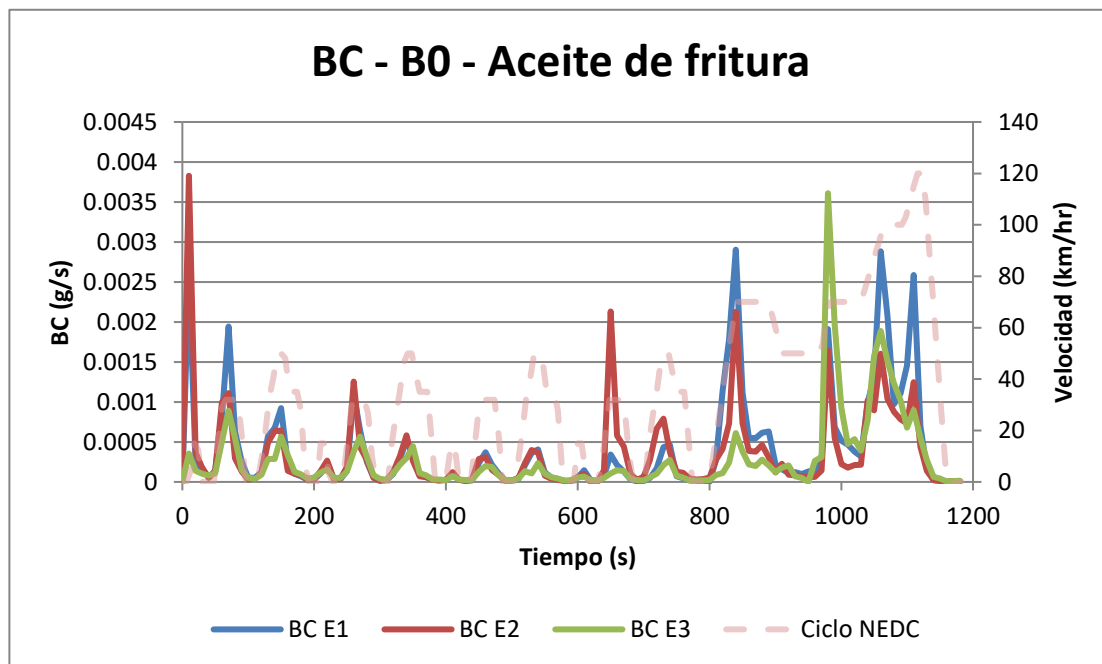
Promedio MP vs Frio - B80 - Grasa animal

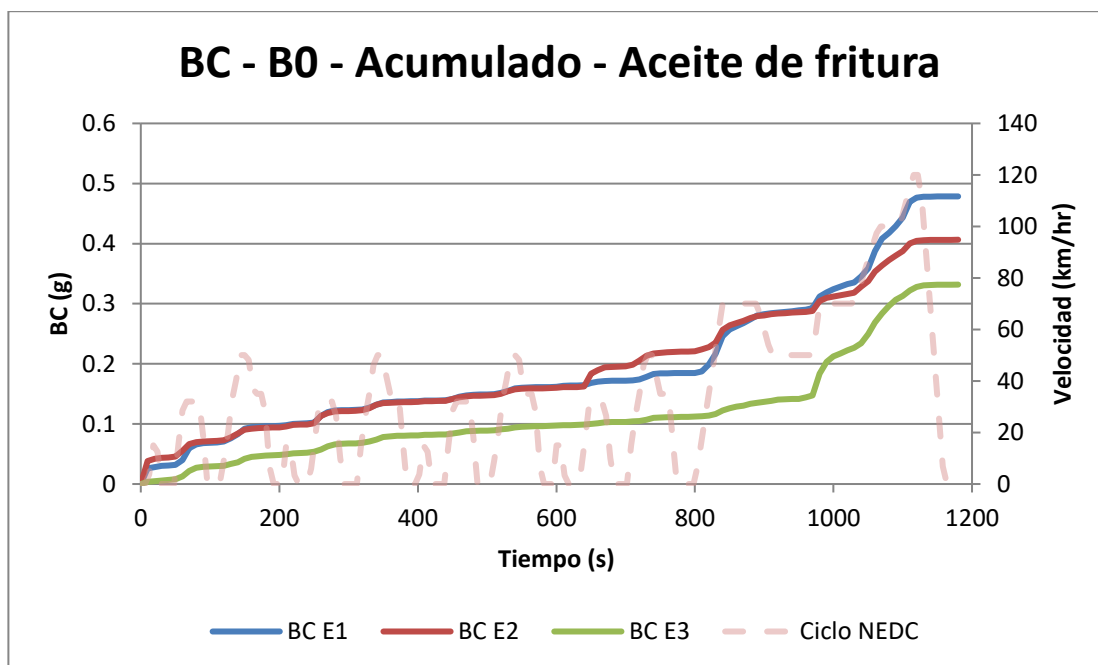
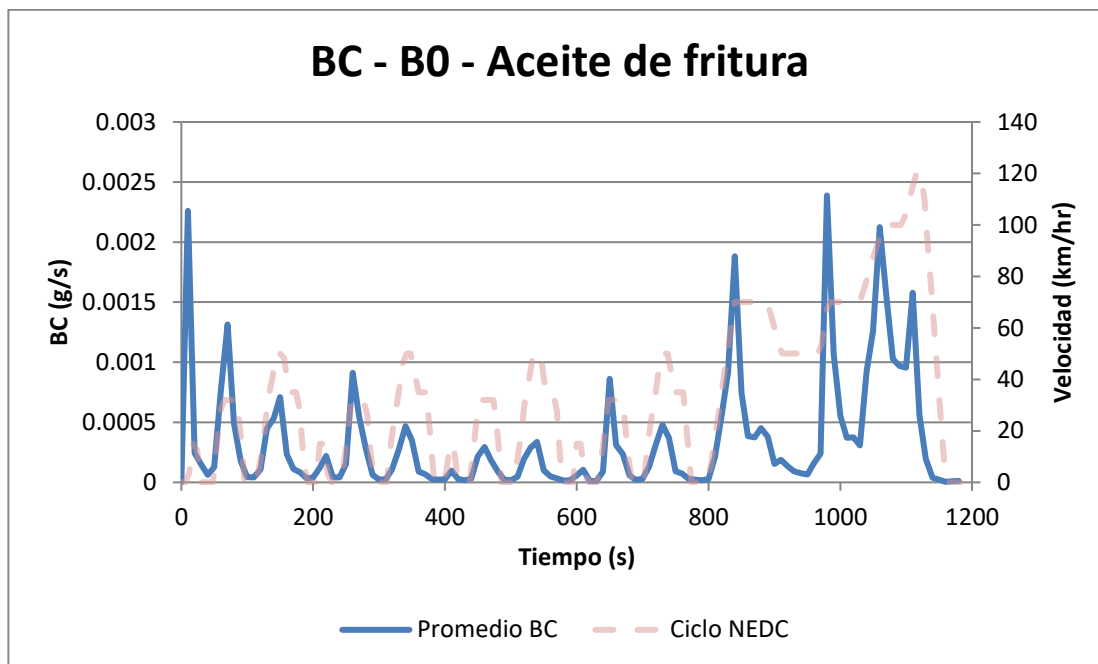


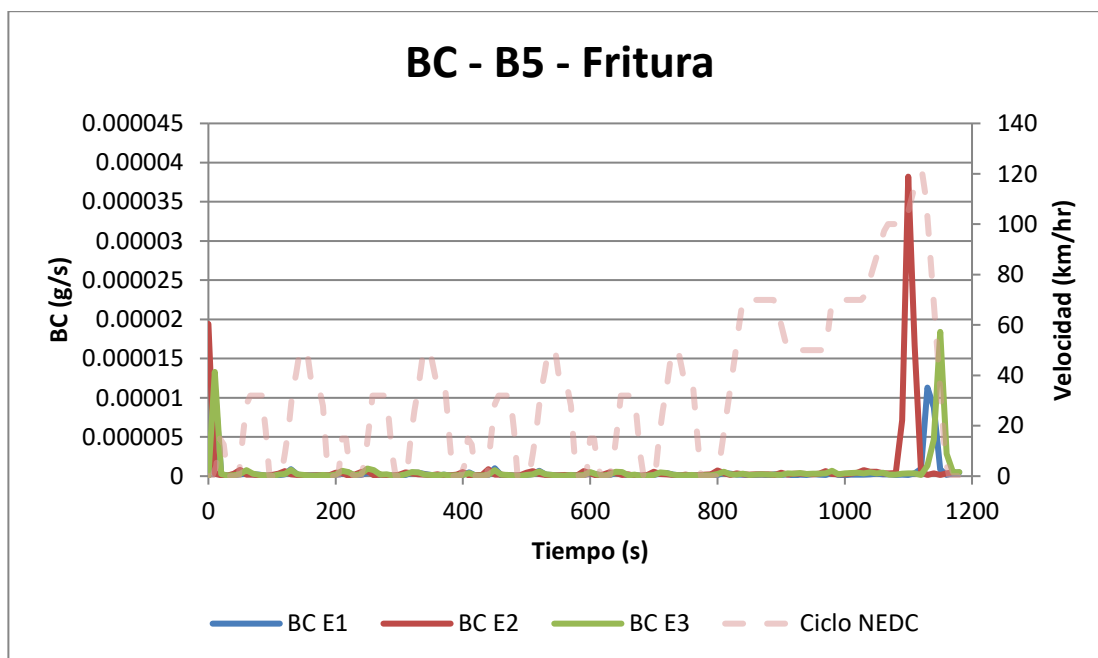
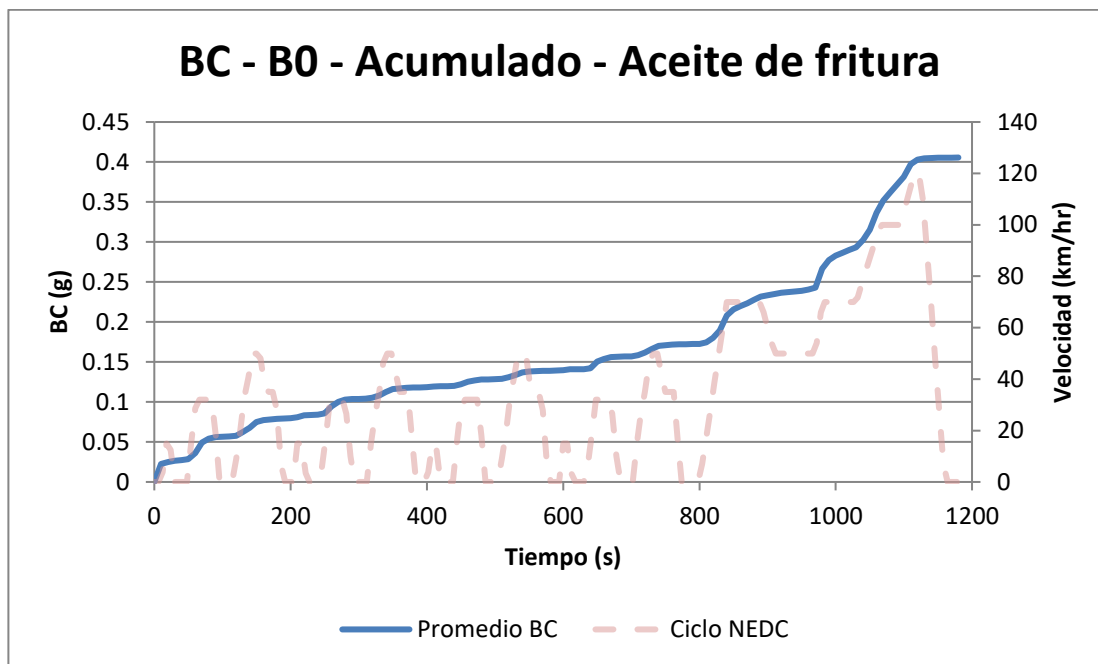
6.4 Anexo D – Resultados granulométricos BC en transiente.

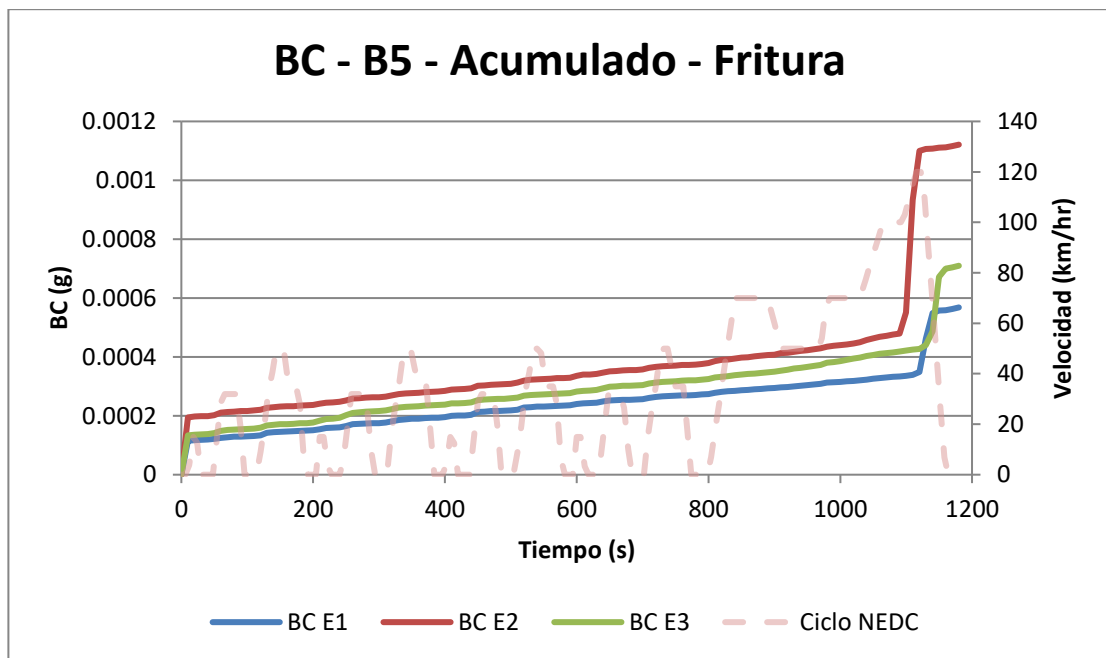
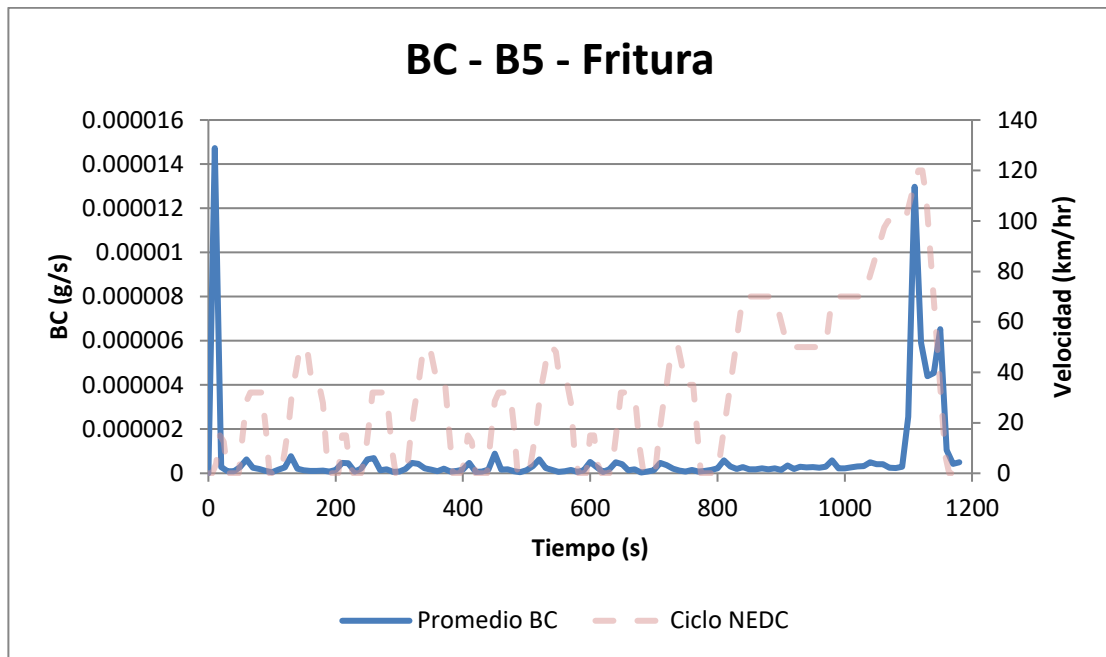
Resultados de granulometría para BC en transiente para combustibles de distintos orígenes.

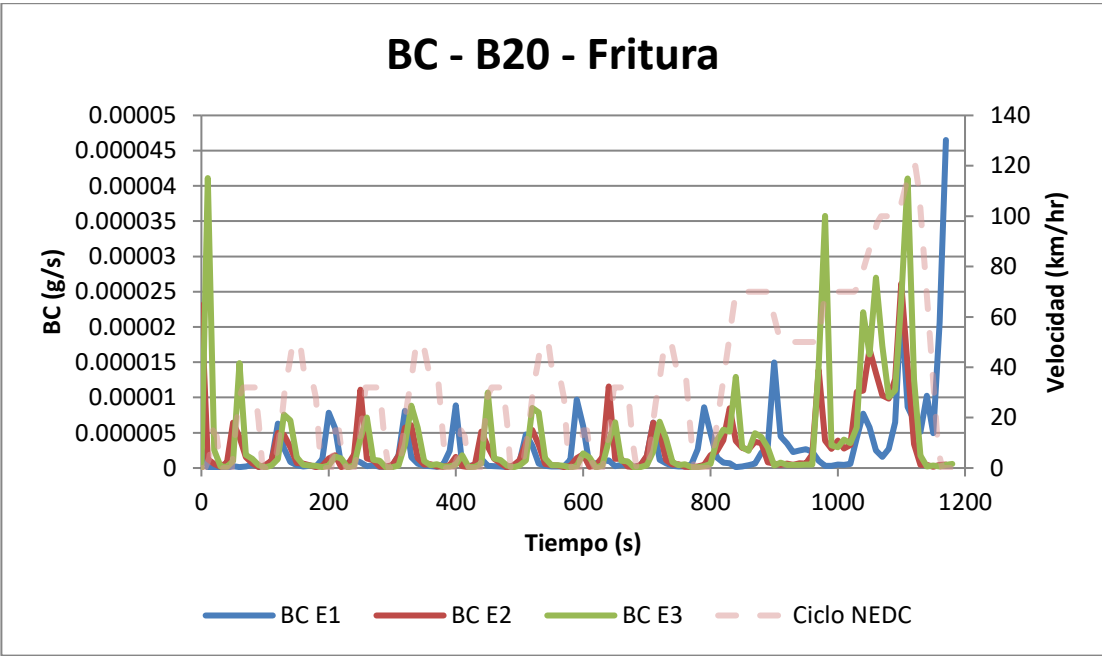
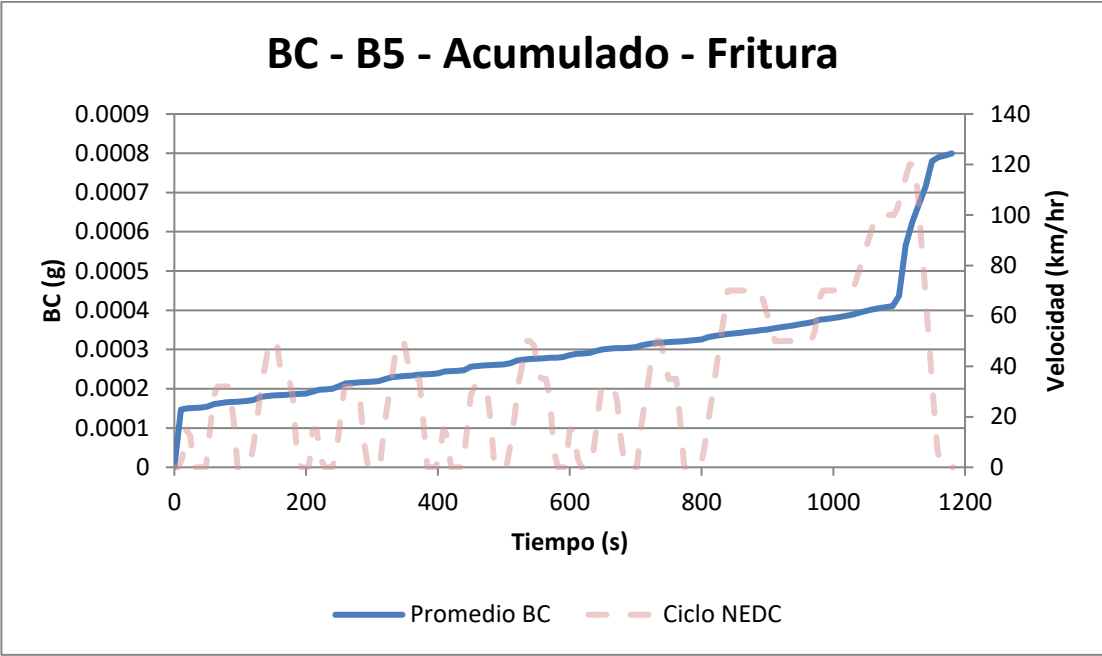
6.4.1 Aceite de fritura, granulometría para distintas mezclas.

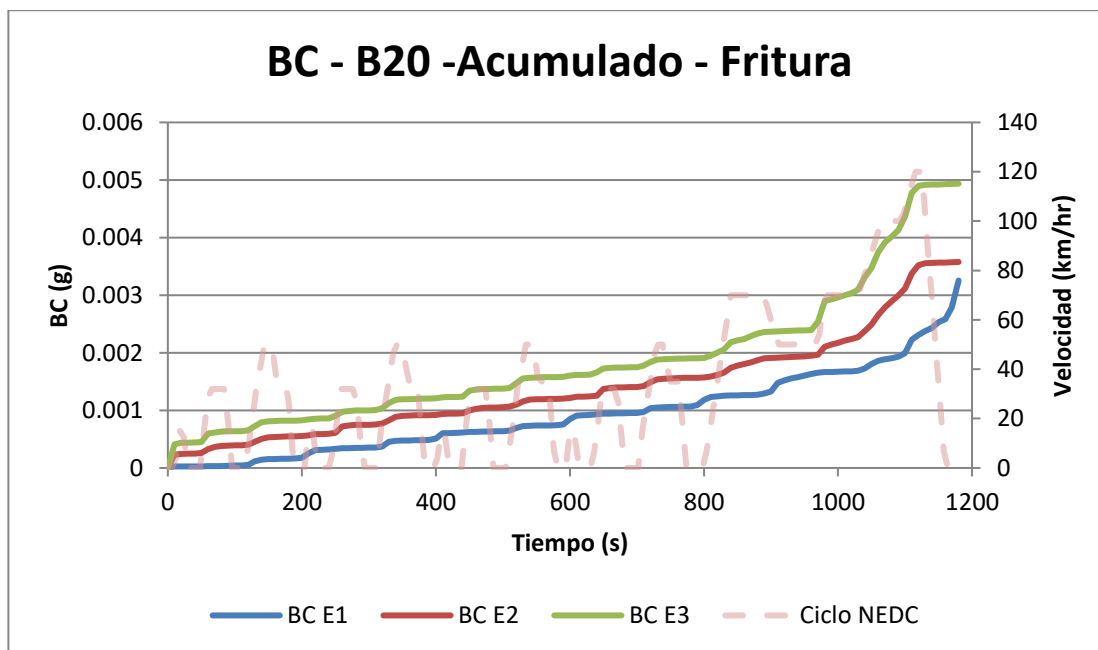
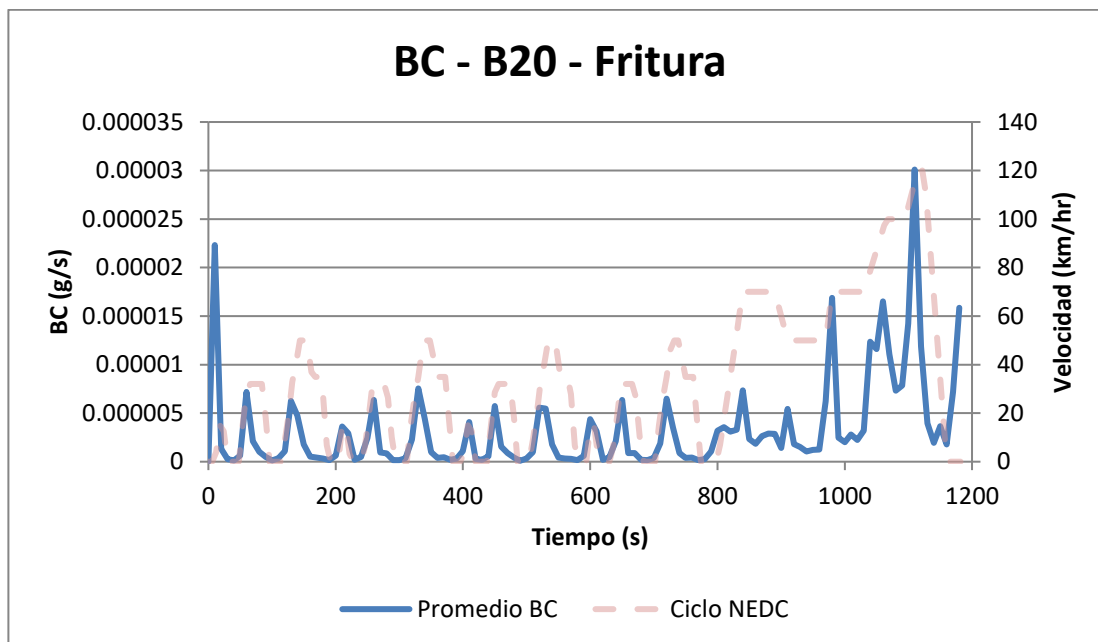


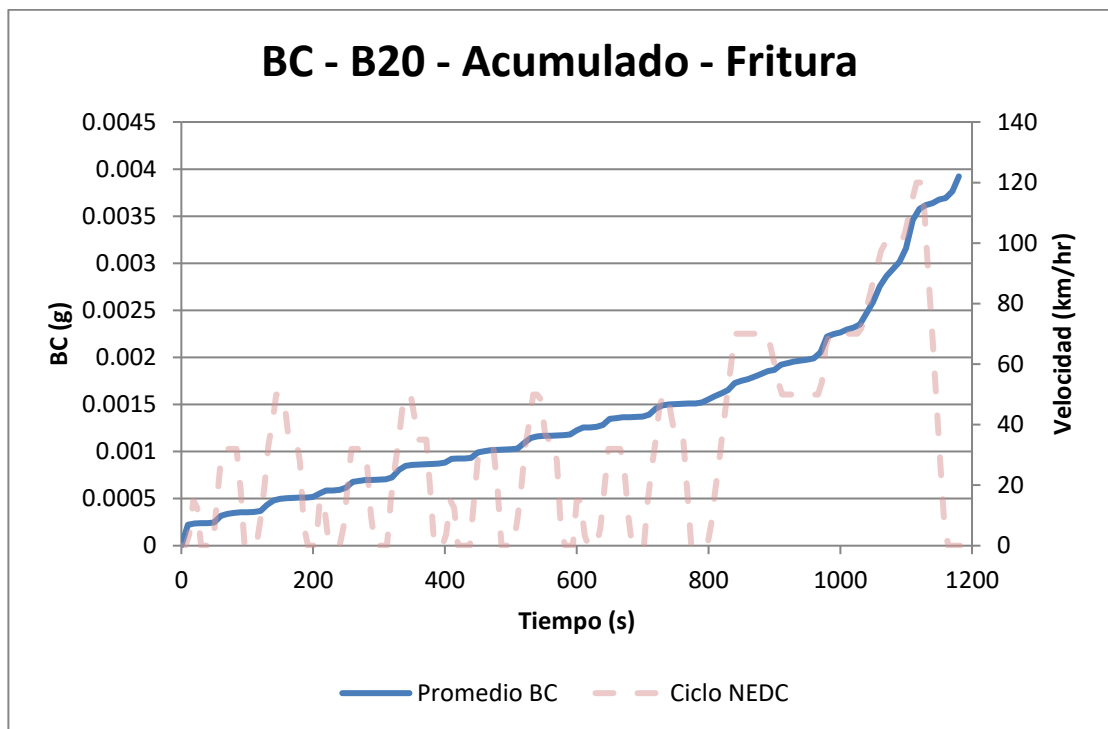




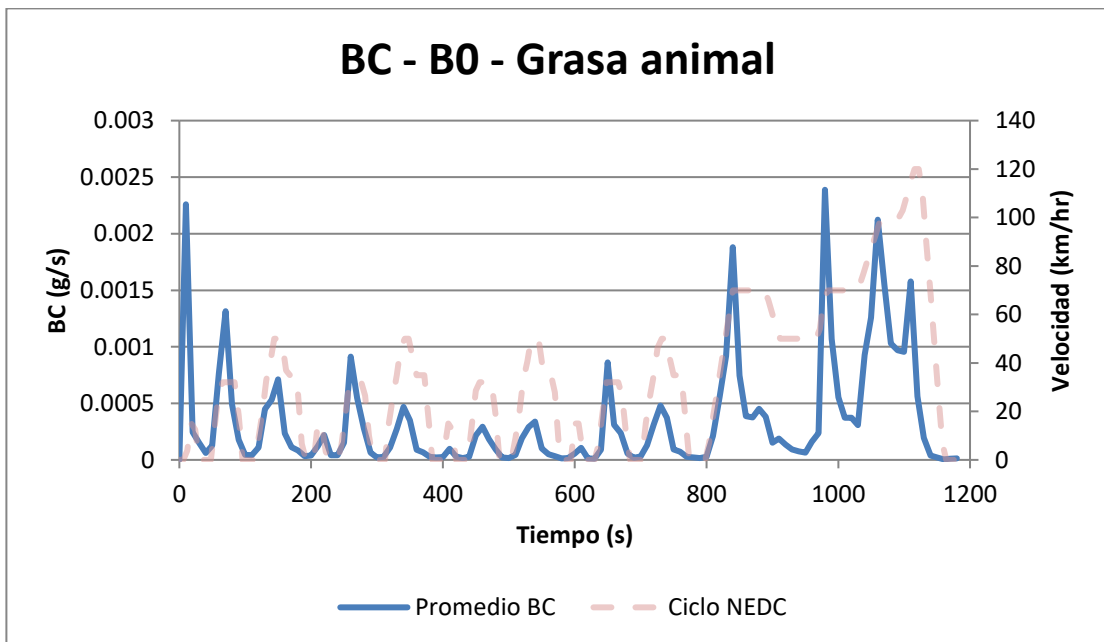
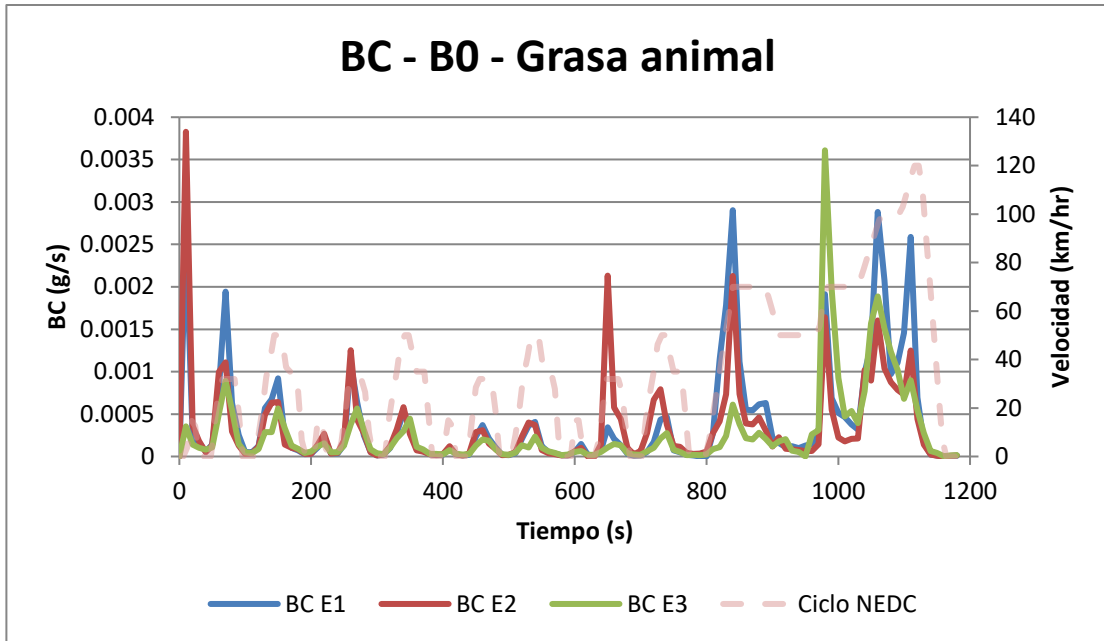


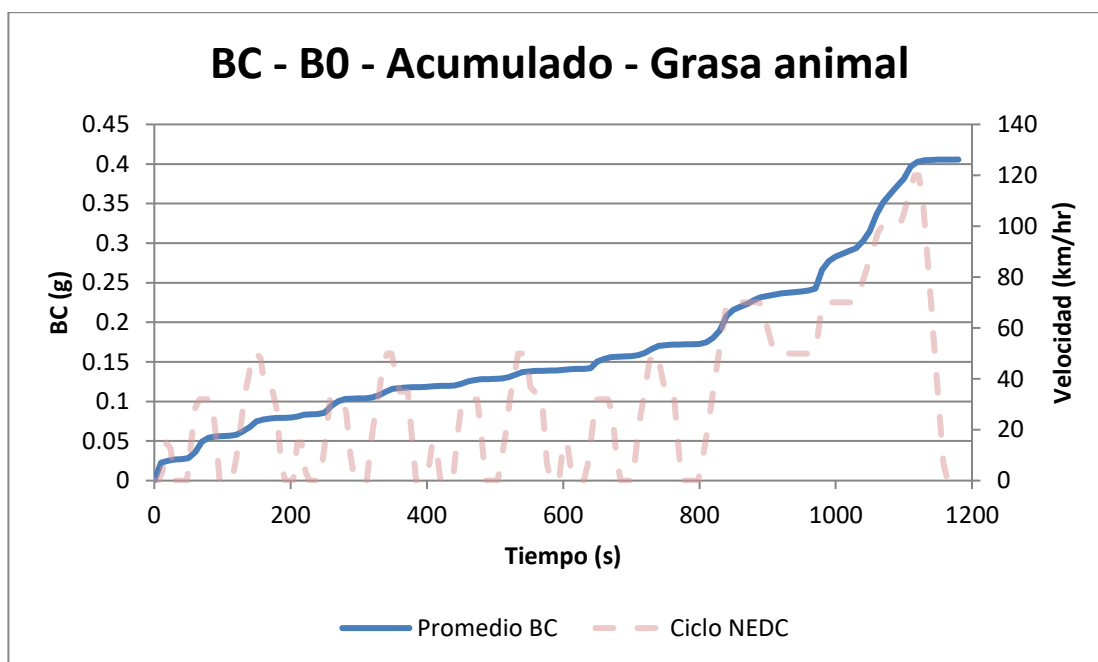
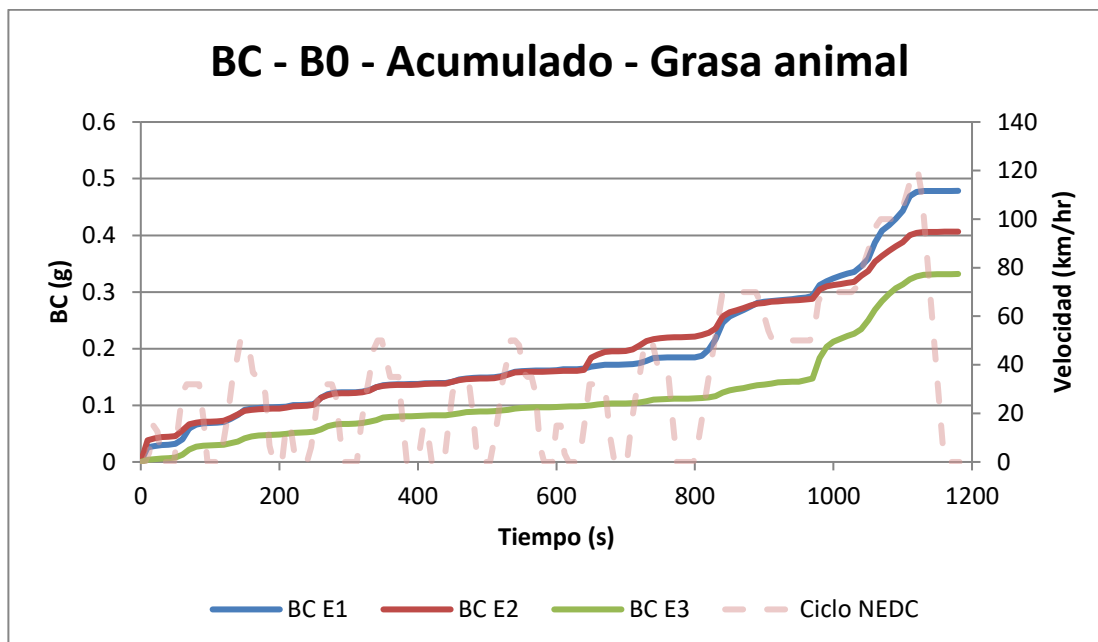


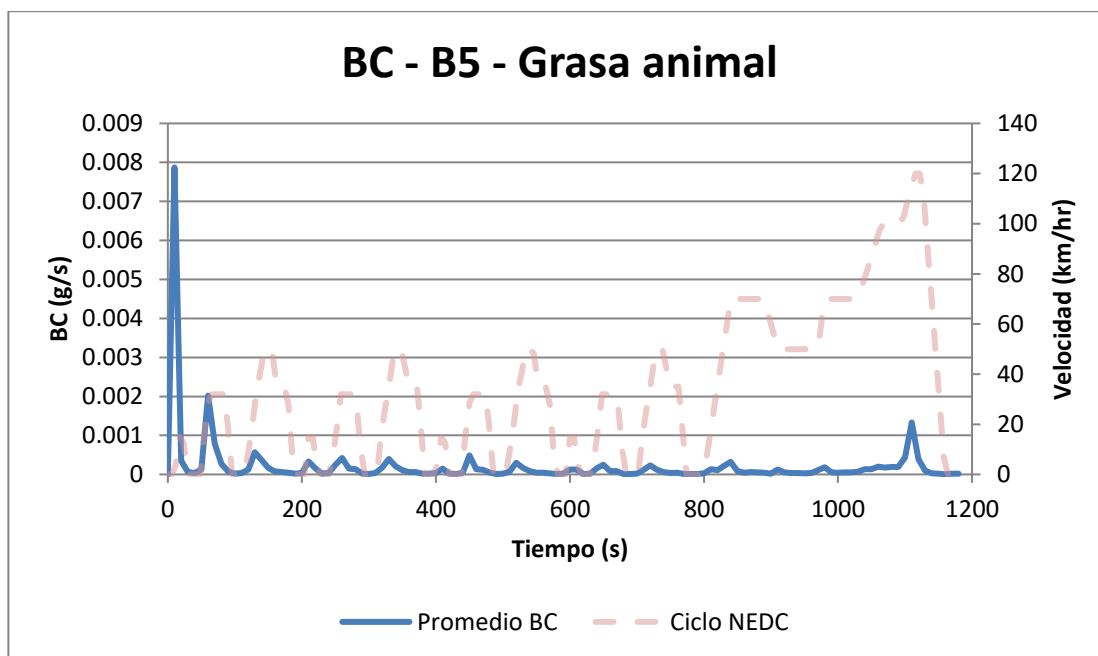
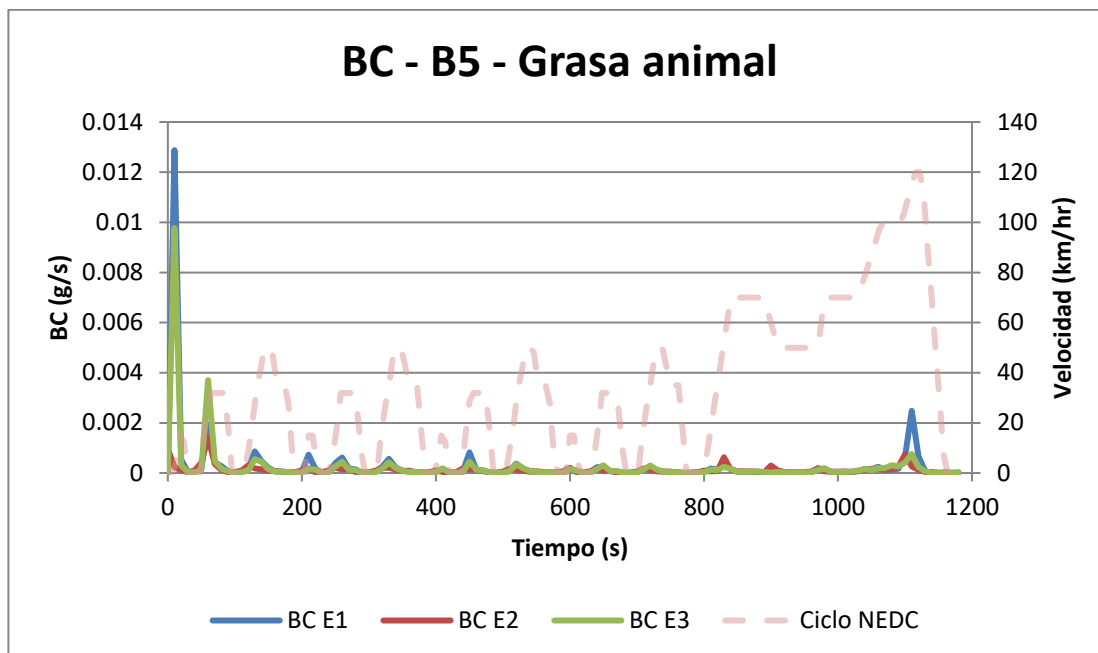


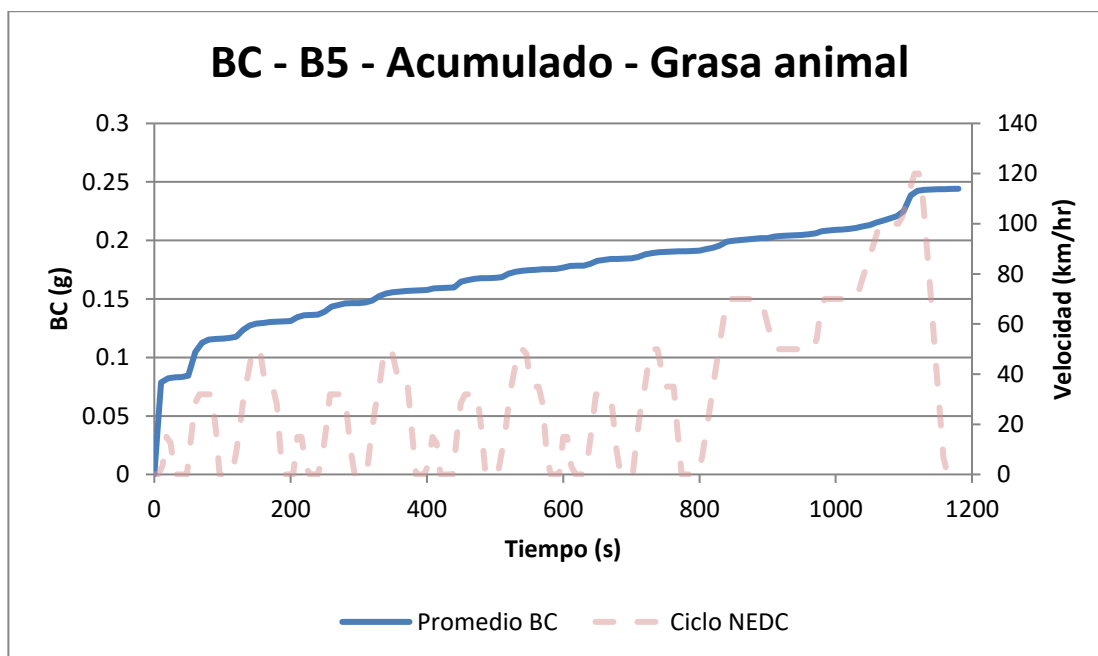
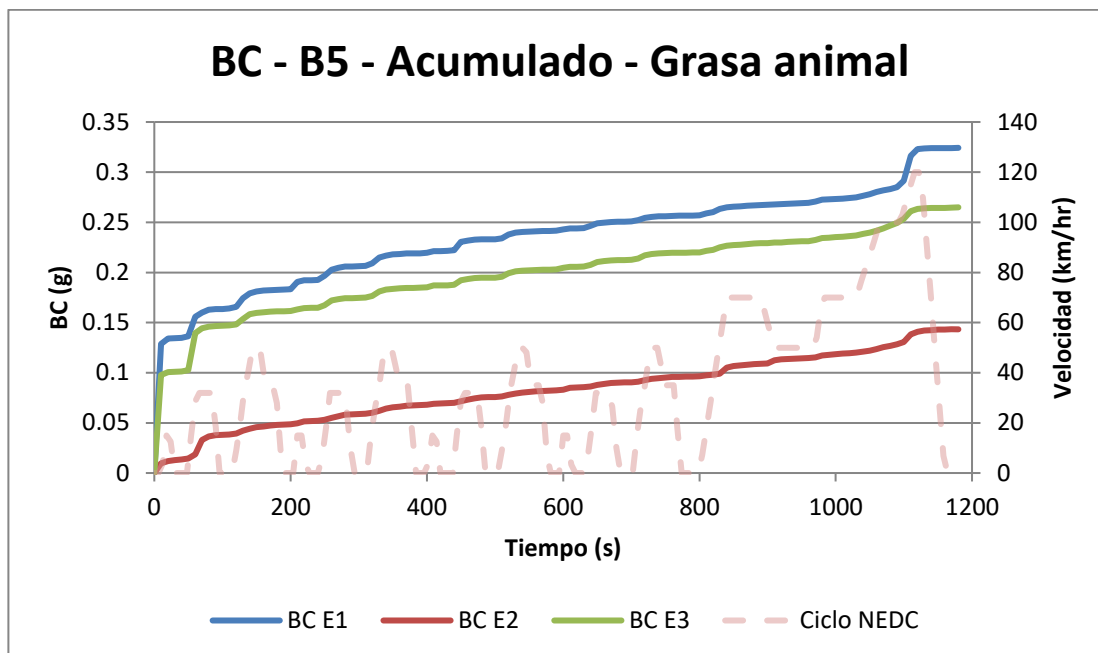


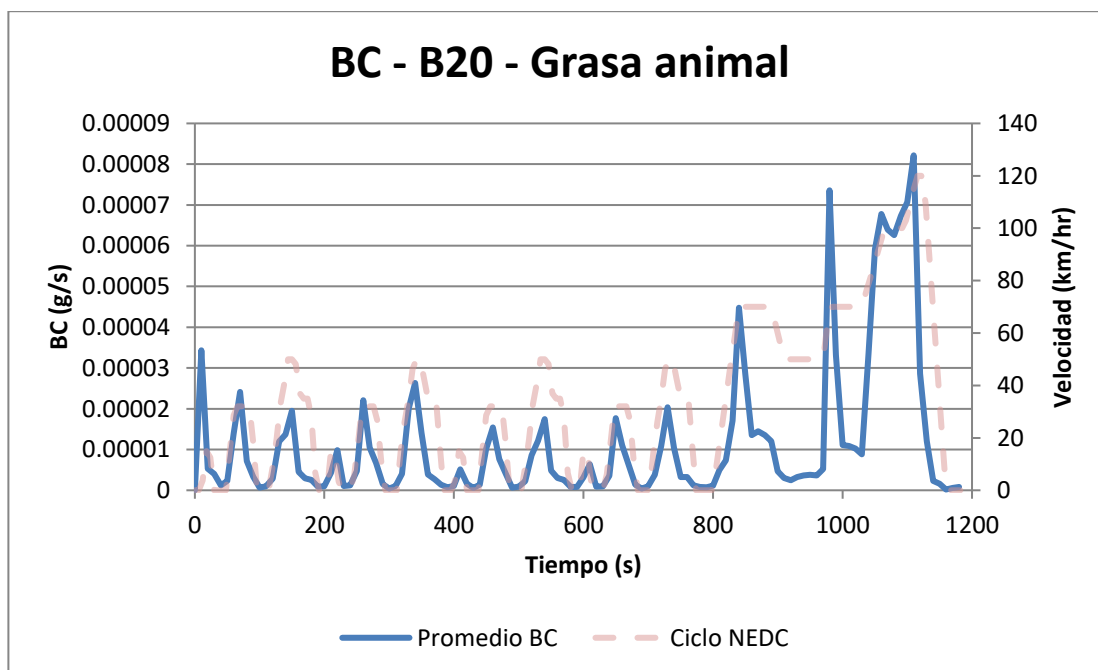
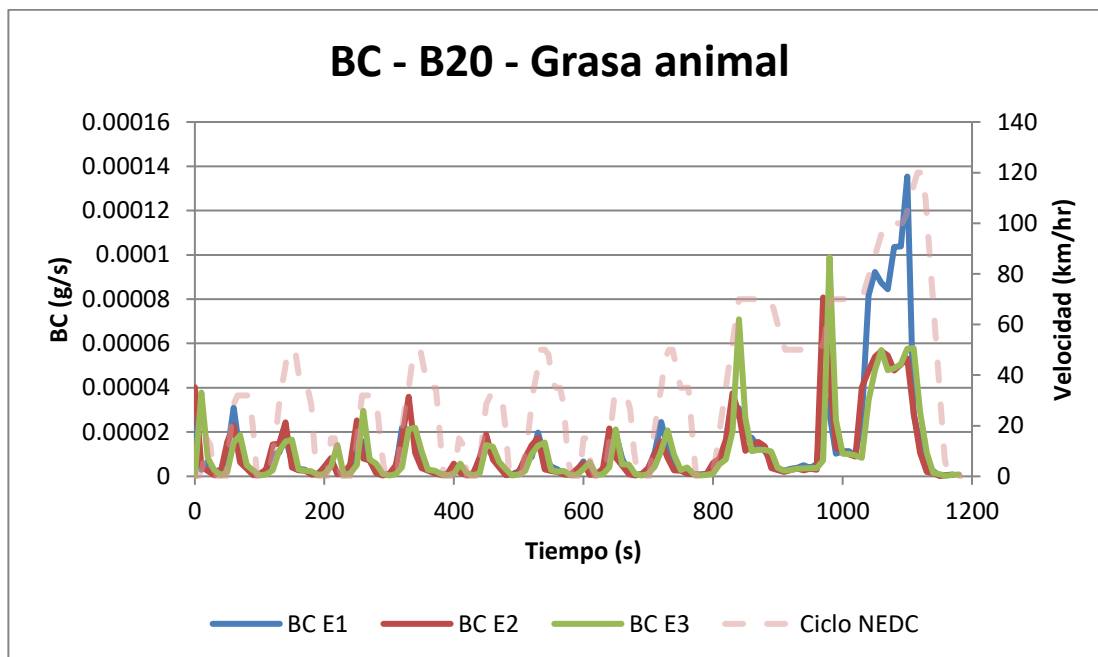
6.4.2 Grasa animal, granulometría para distintas mezclas.

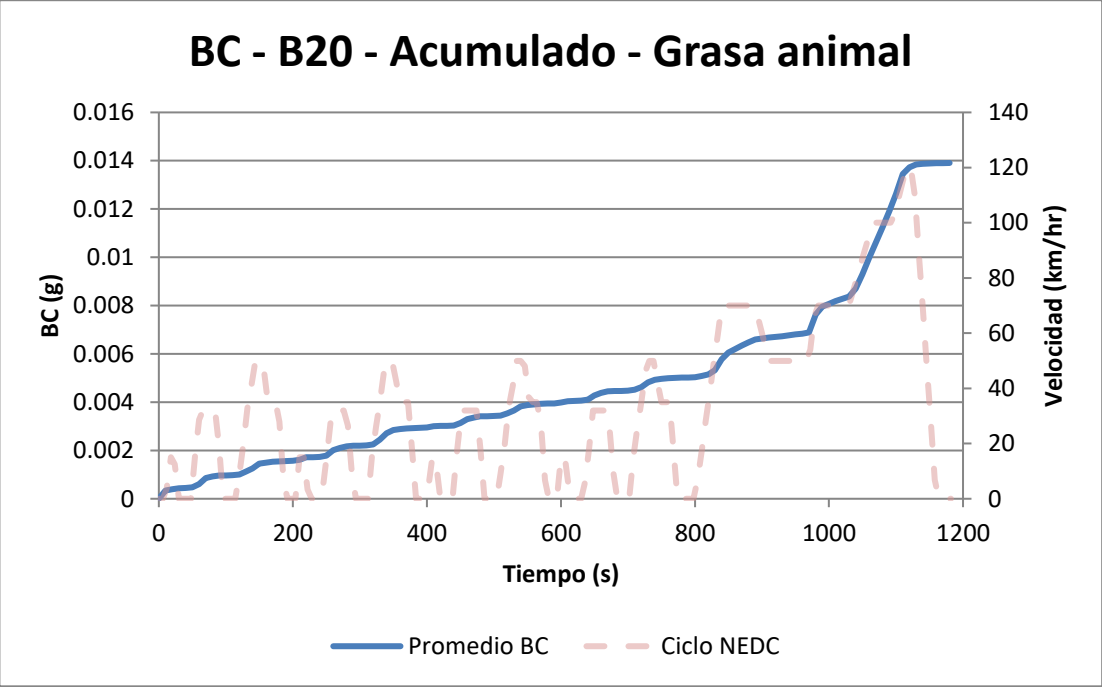
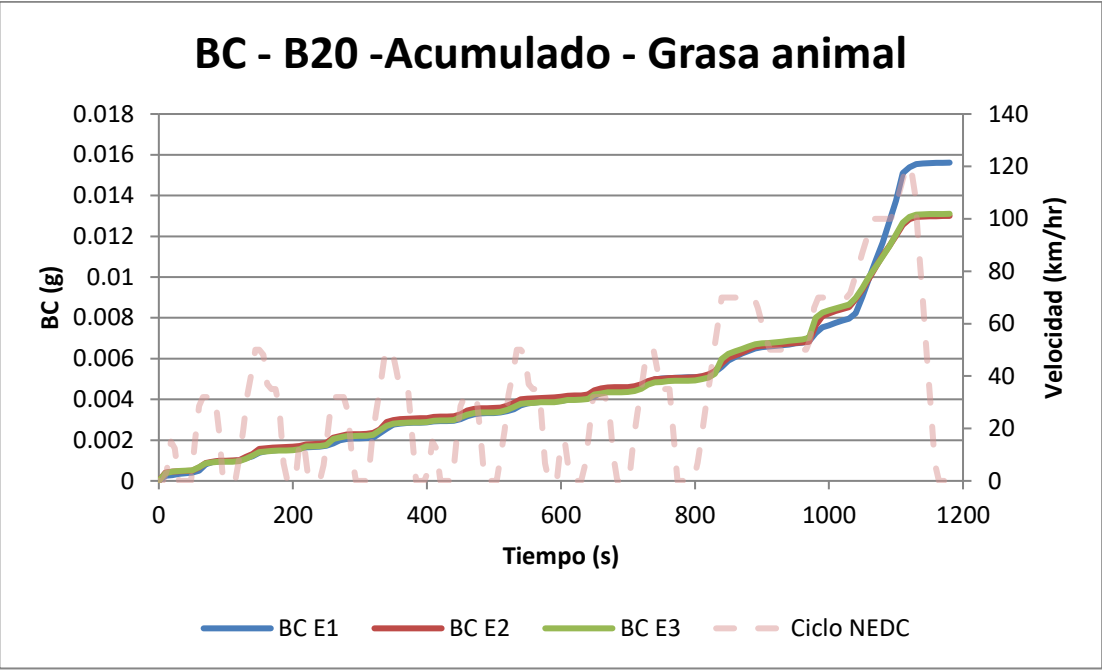


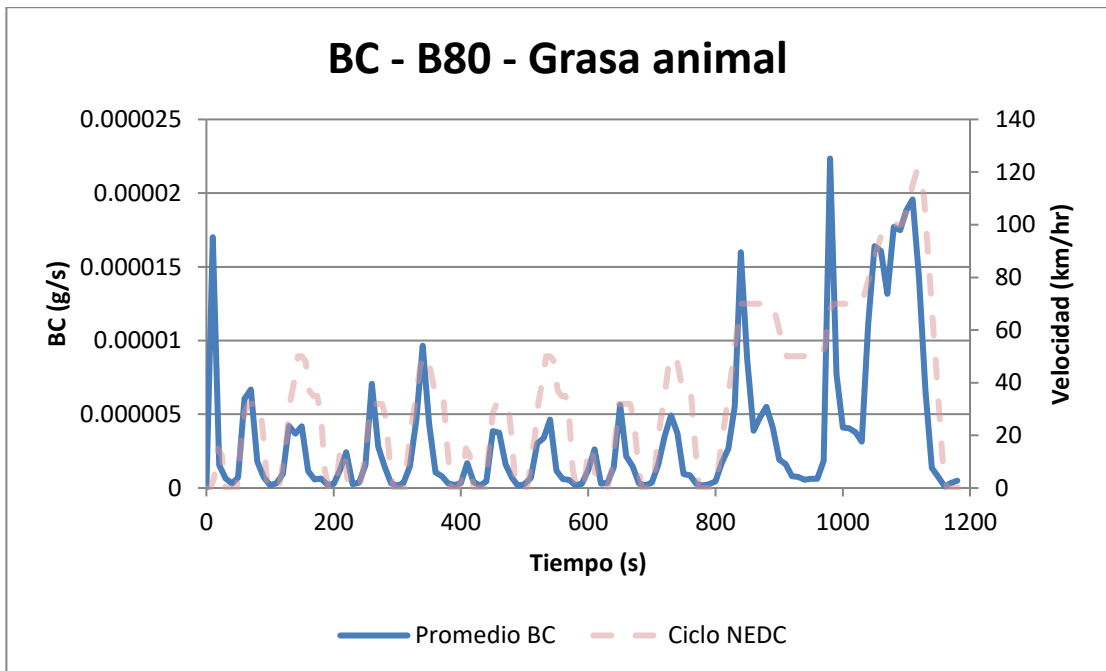
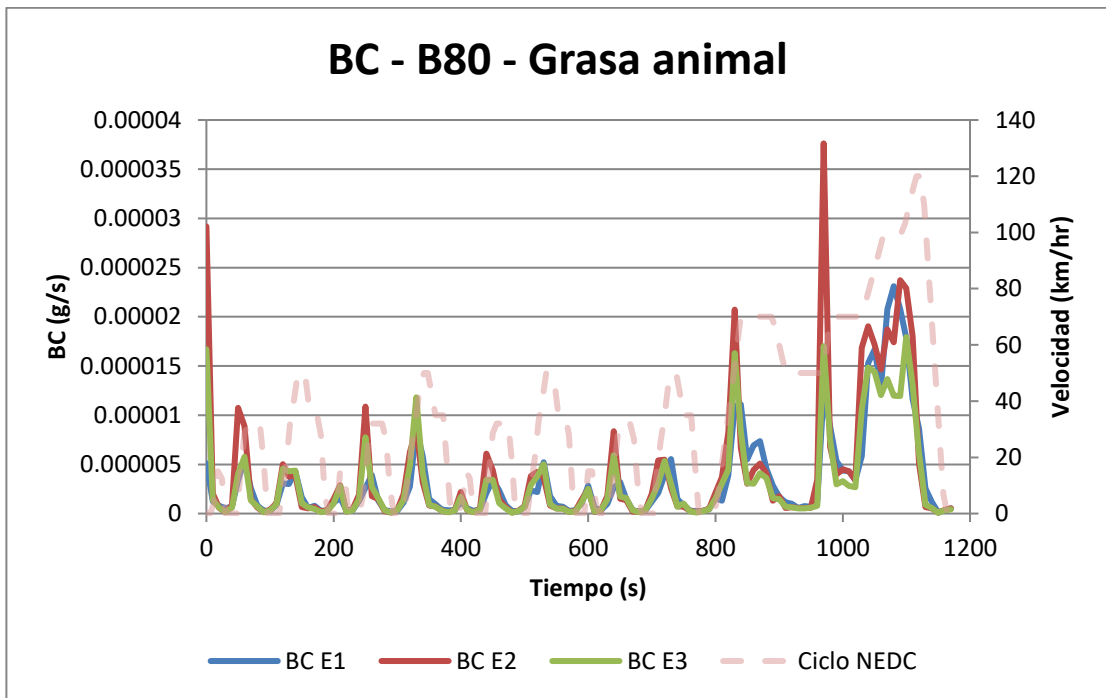


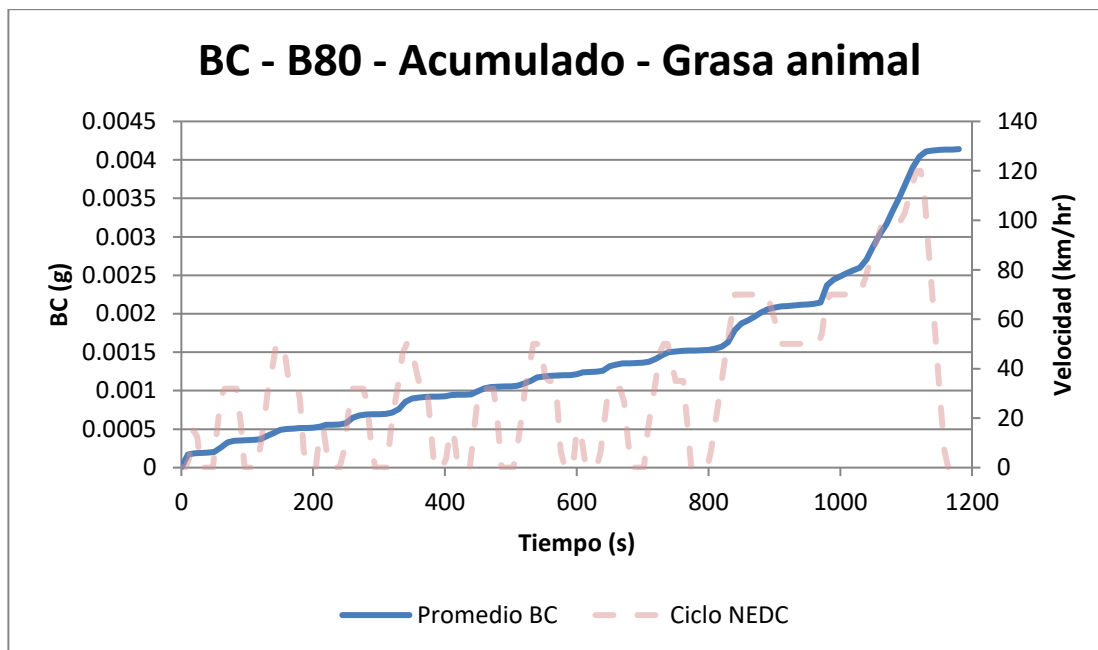
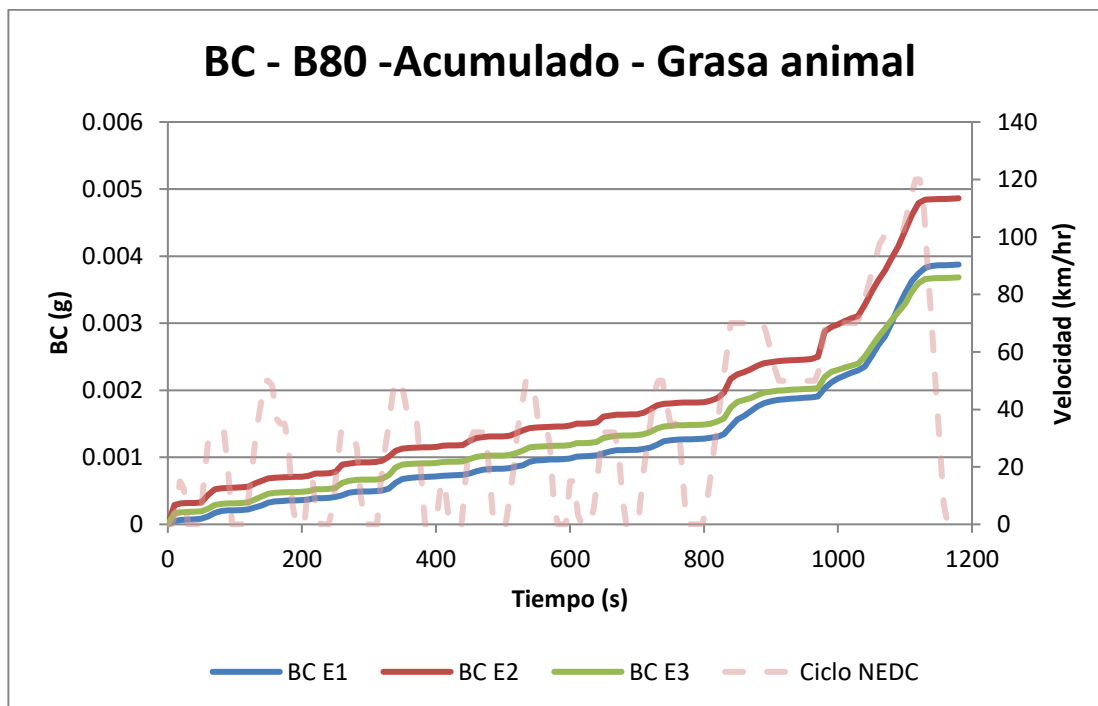




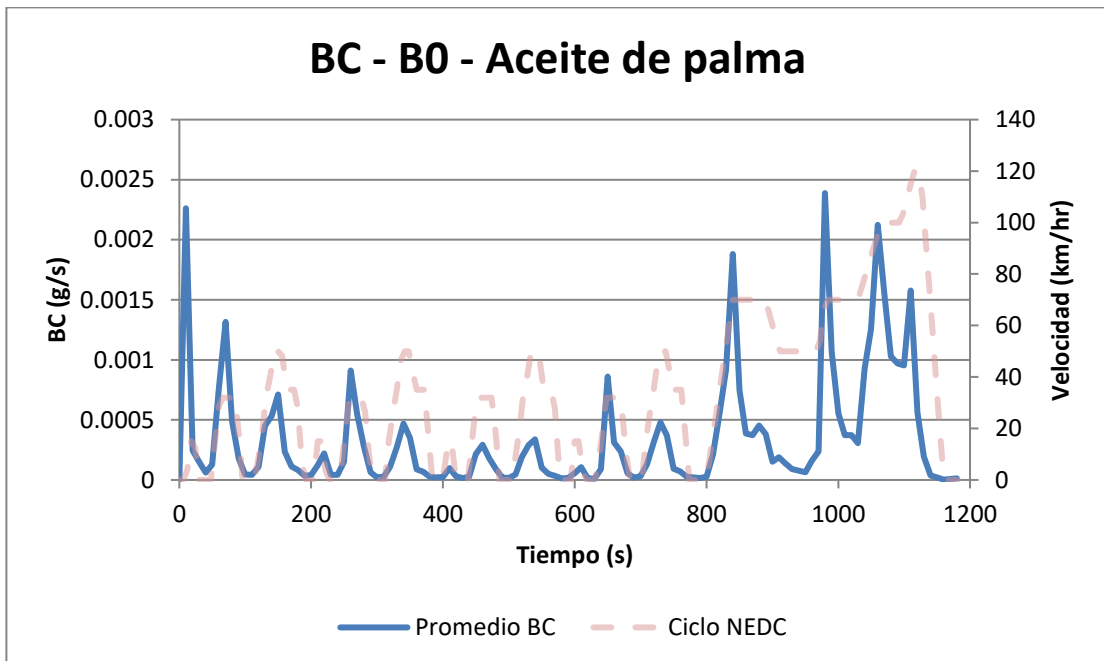
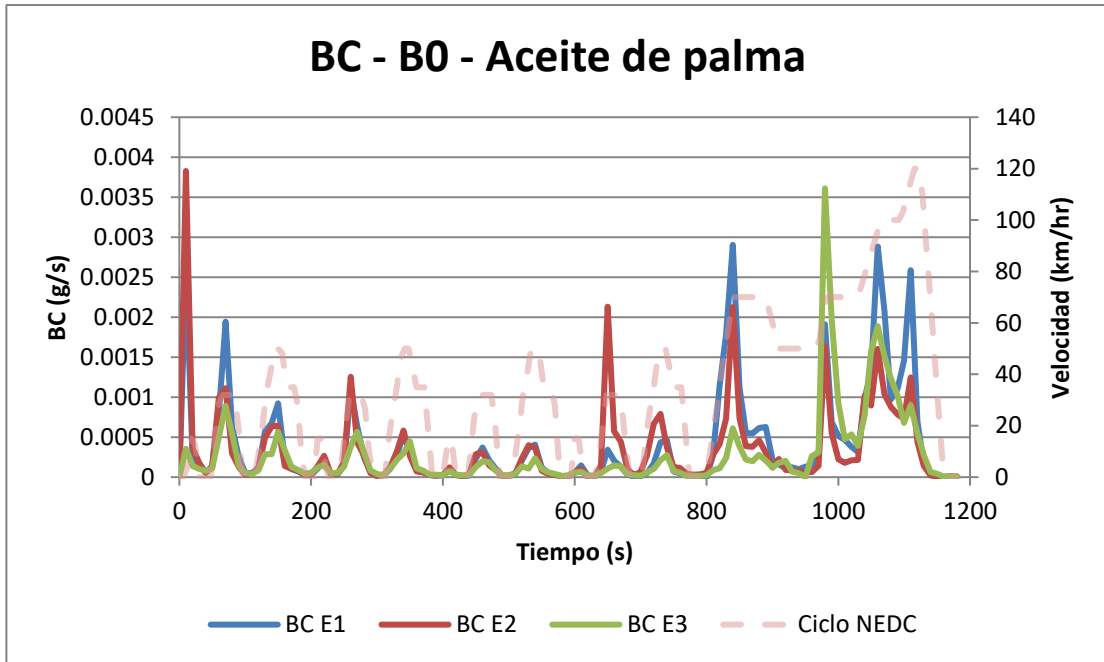


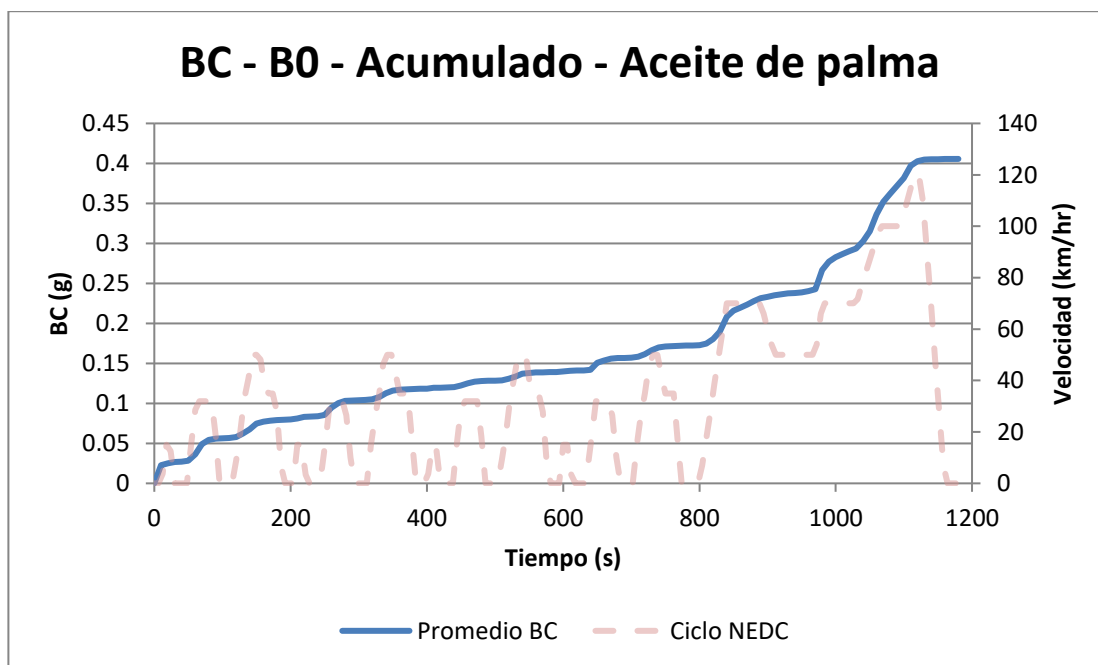
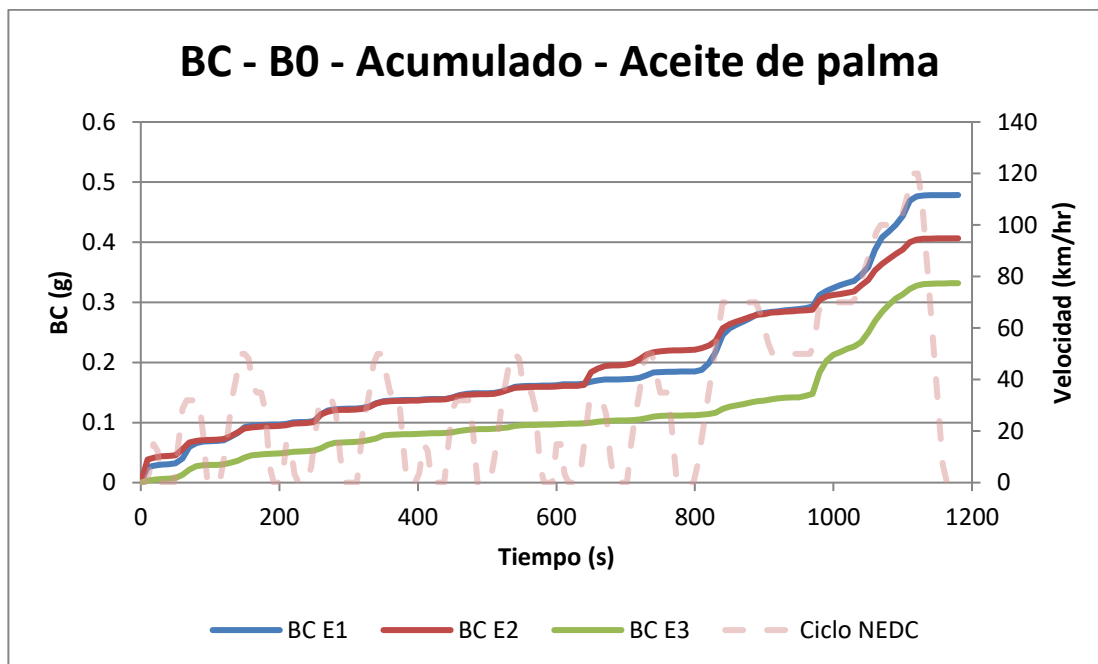


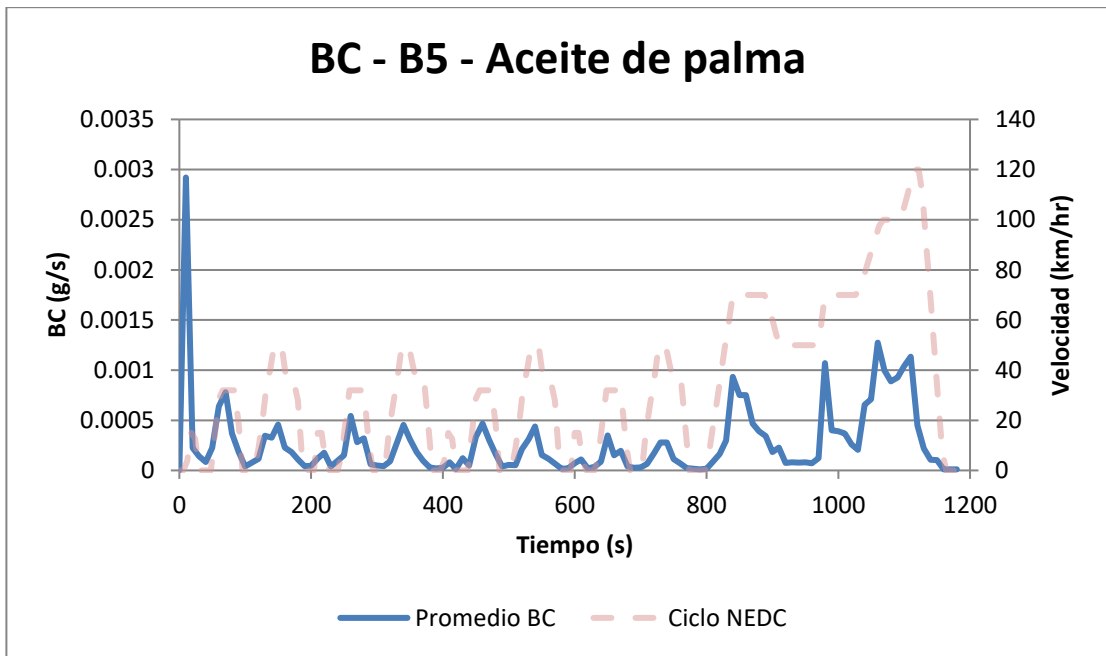
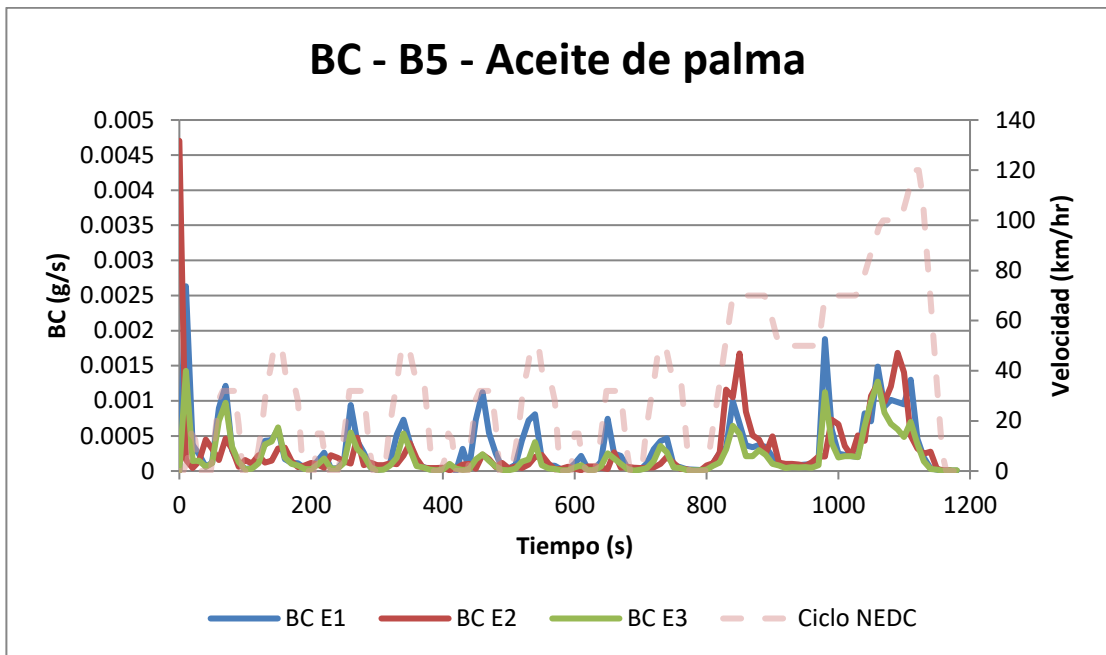


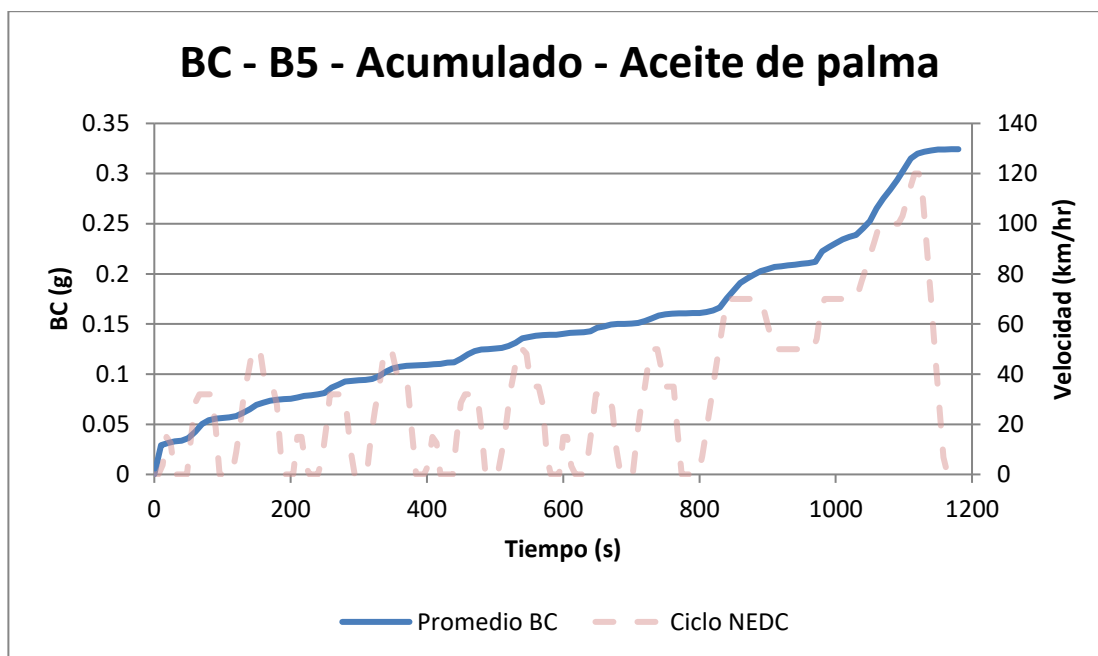
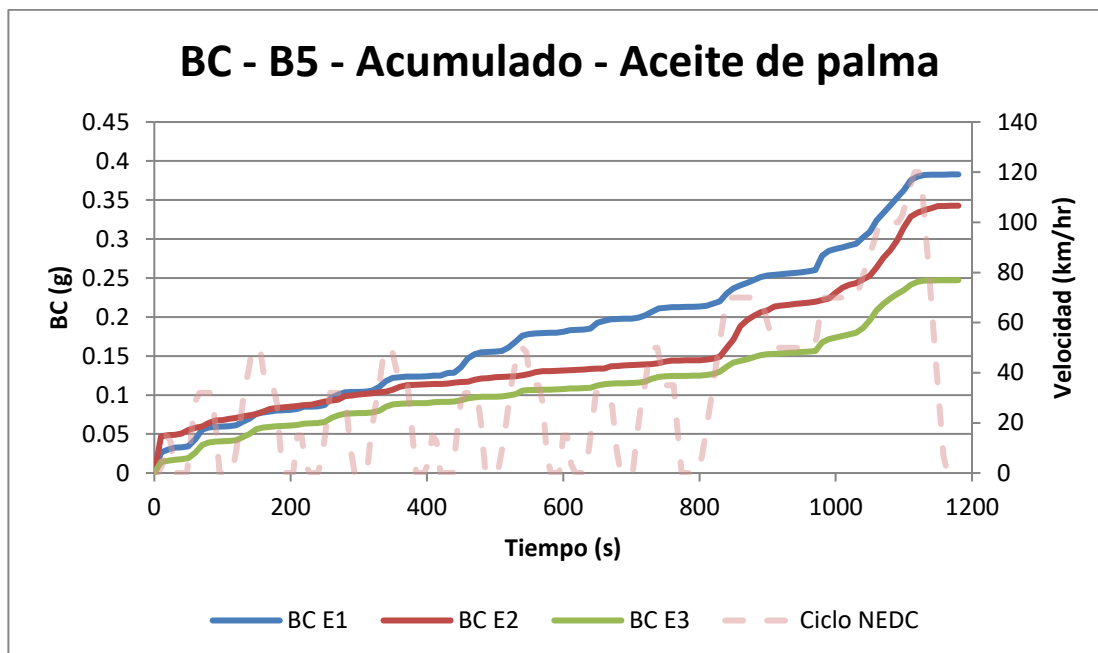


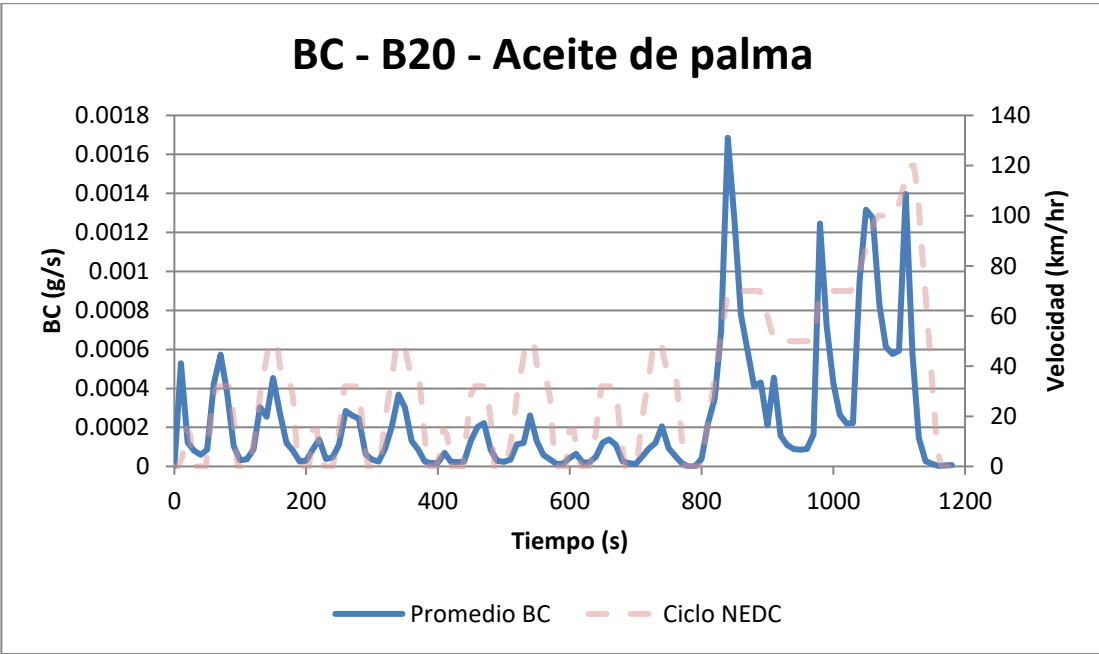
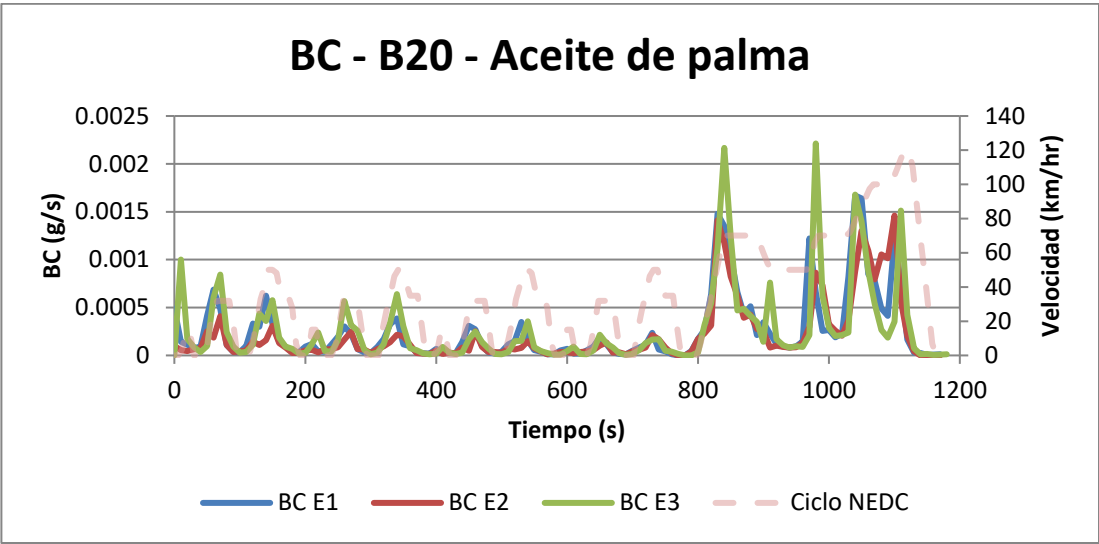
6.4.3 Aceite de palma, granulometría para distintas mezclas.

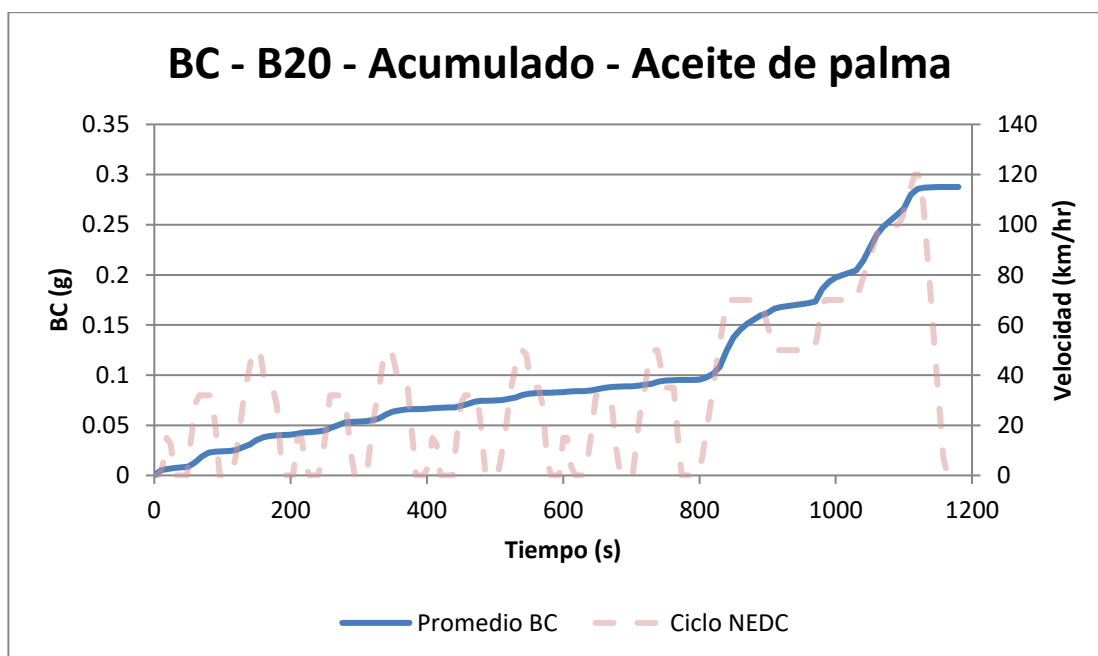
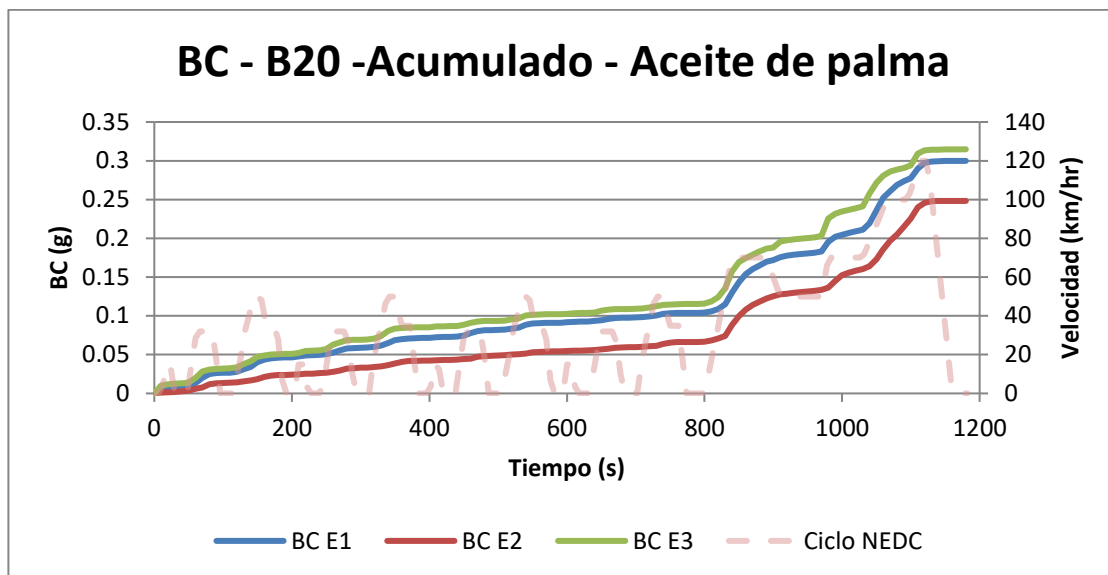


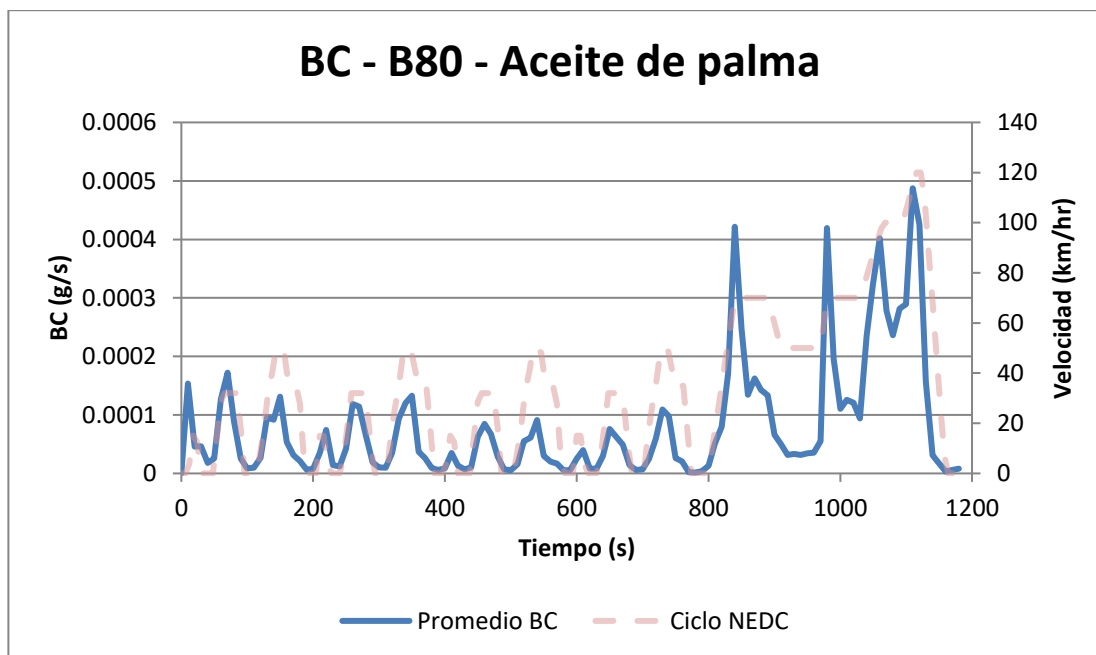
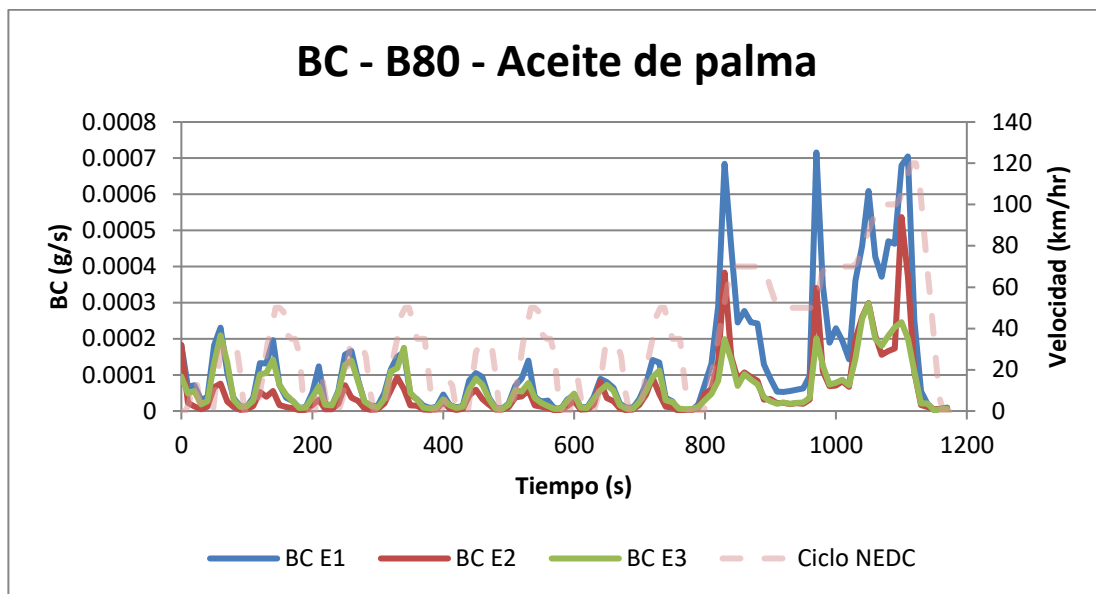


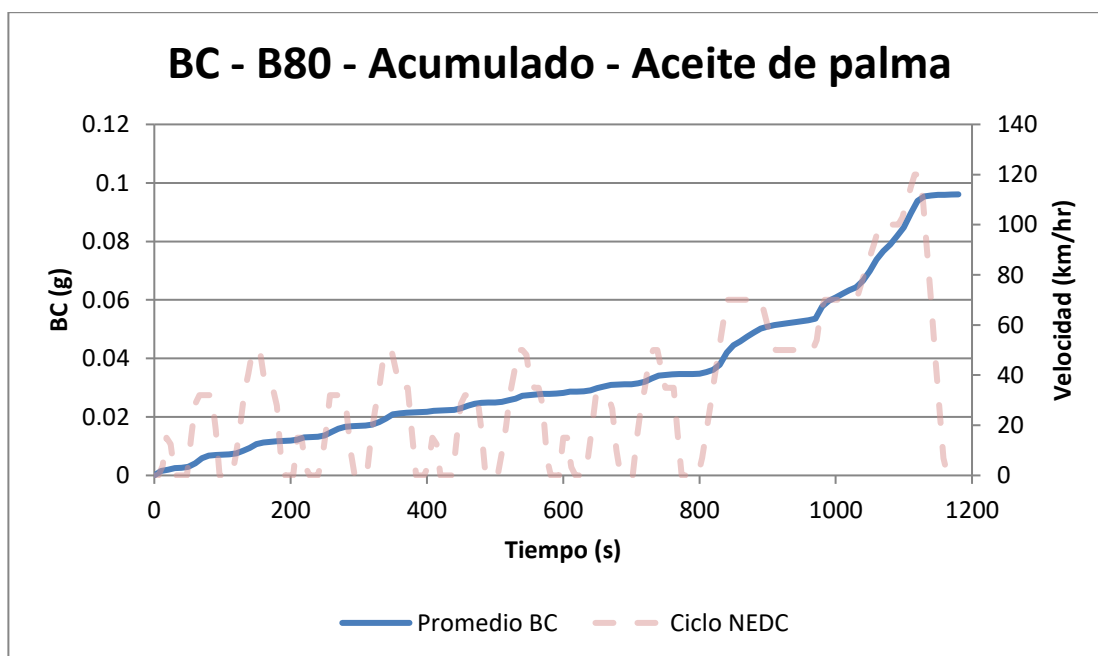
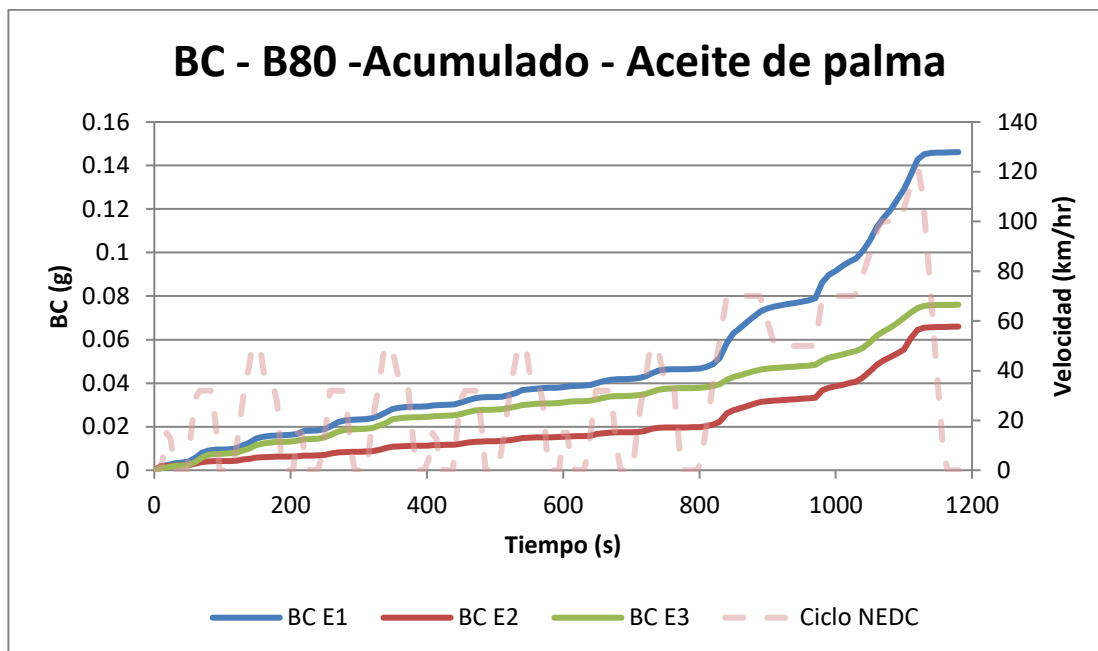




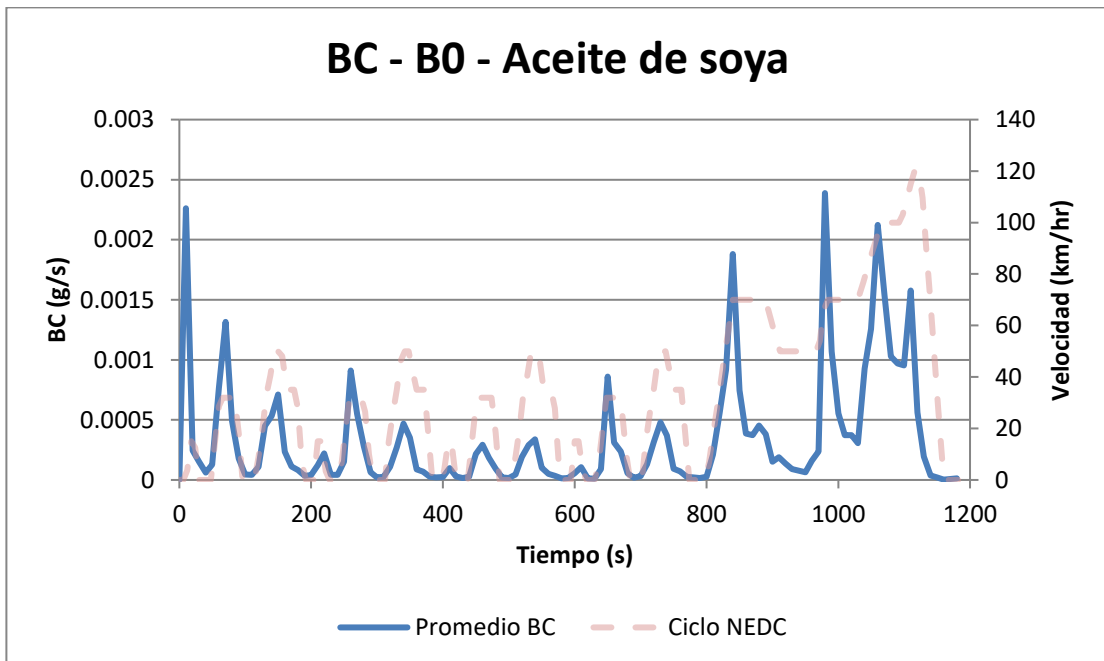
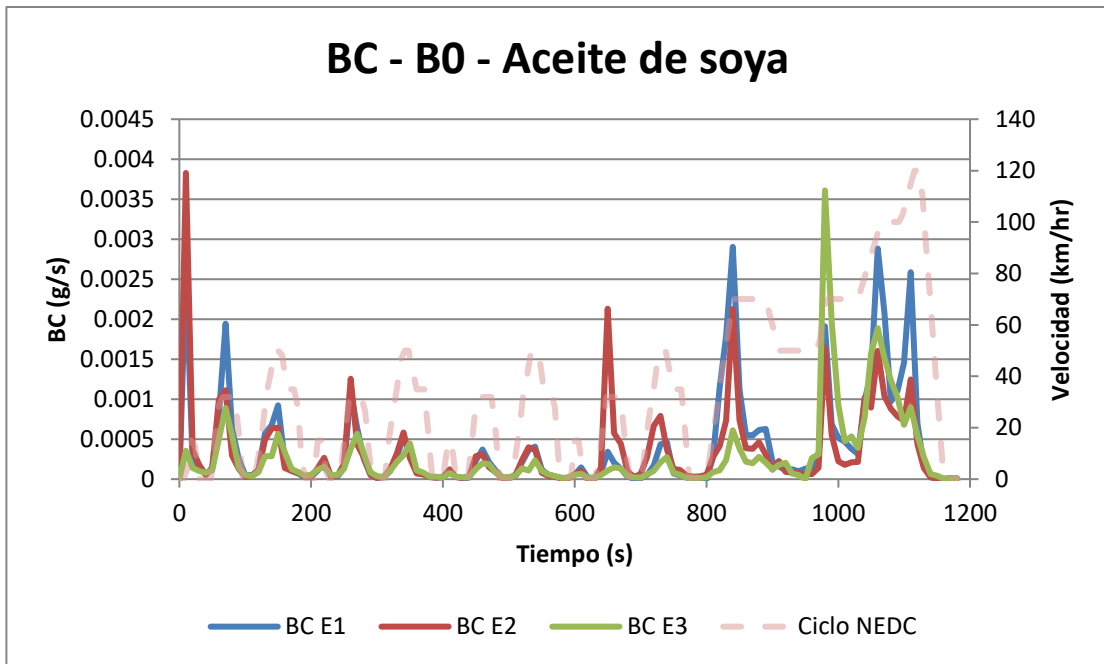


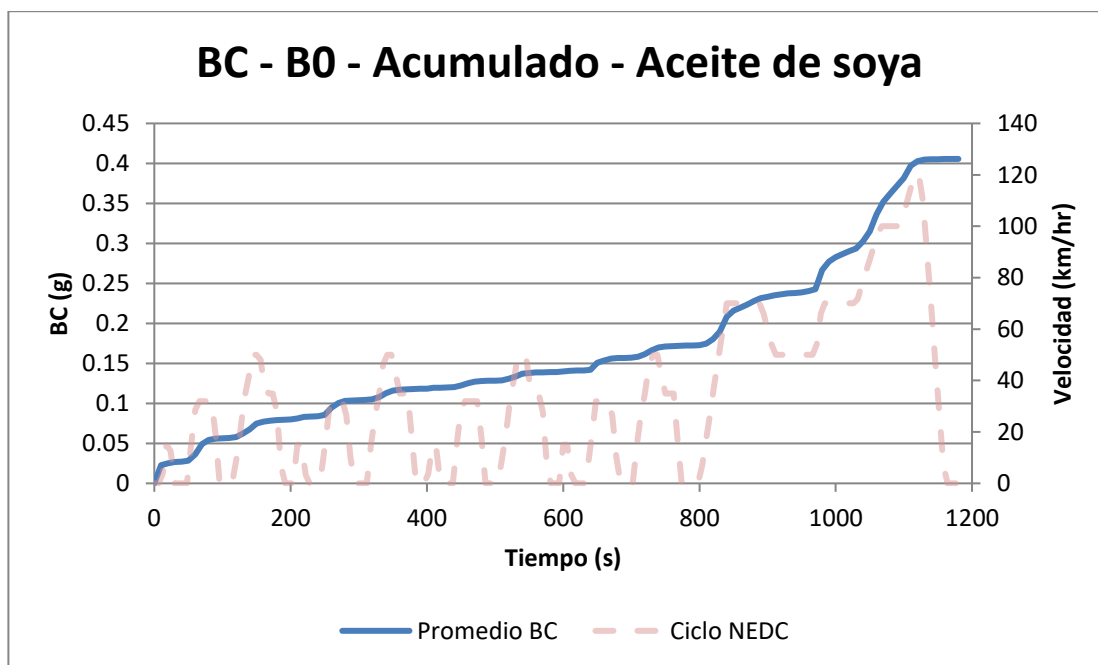
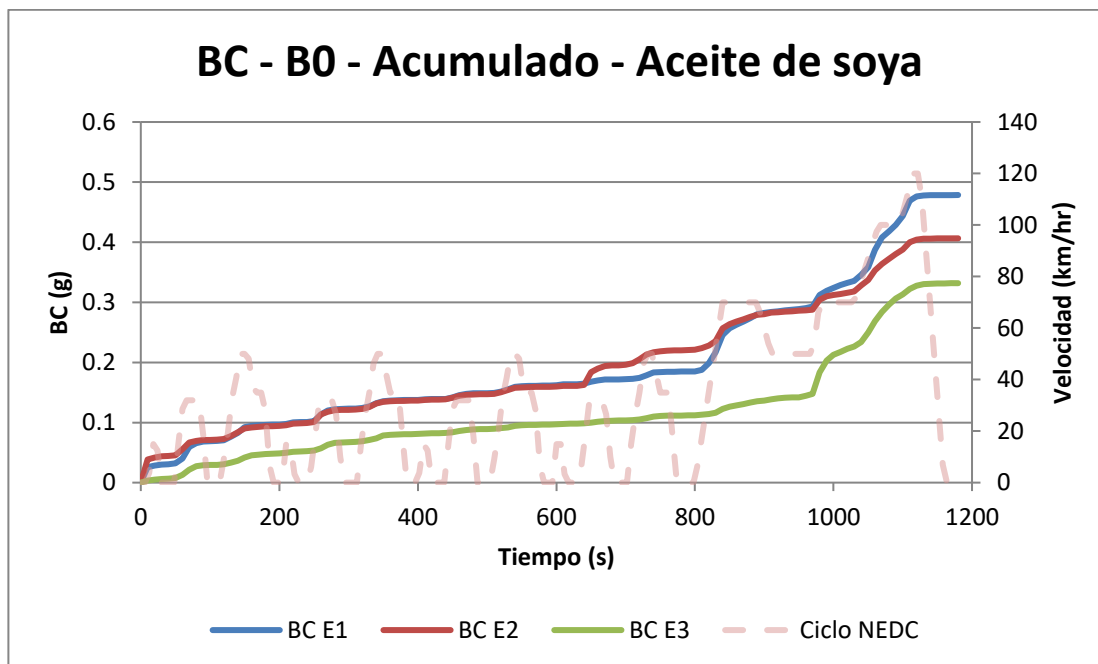


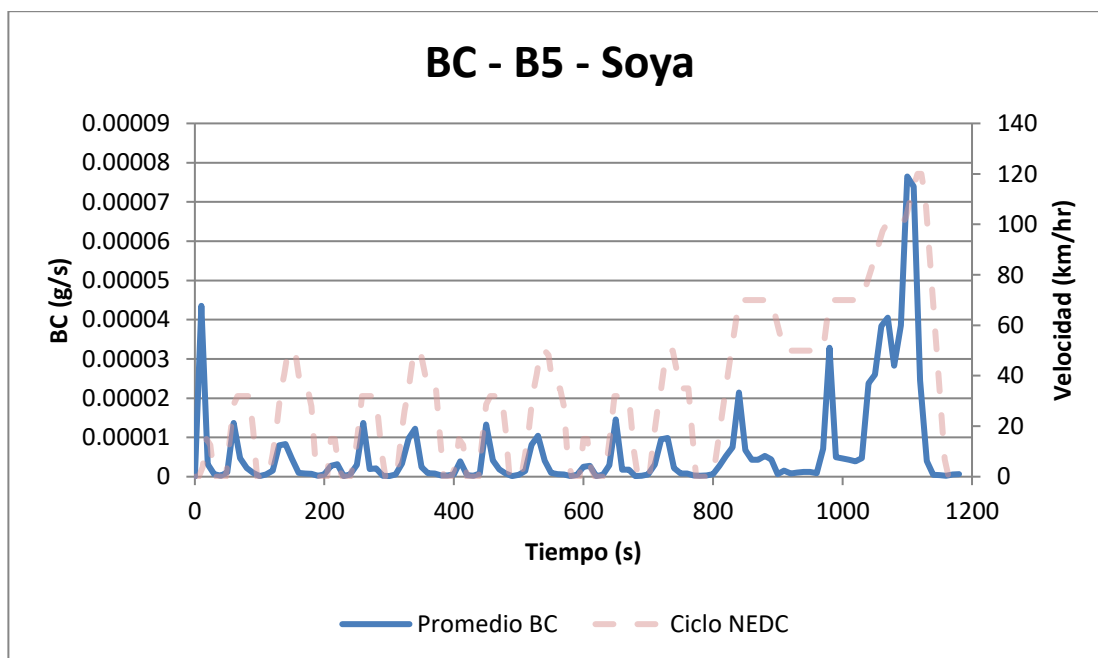
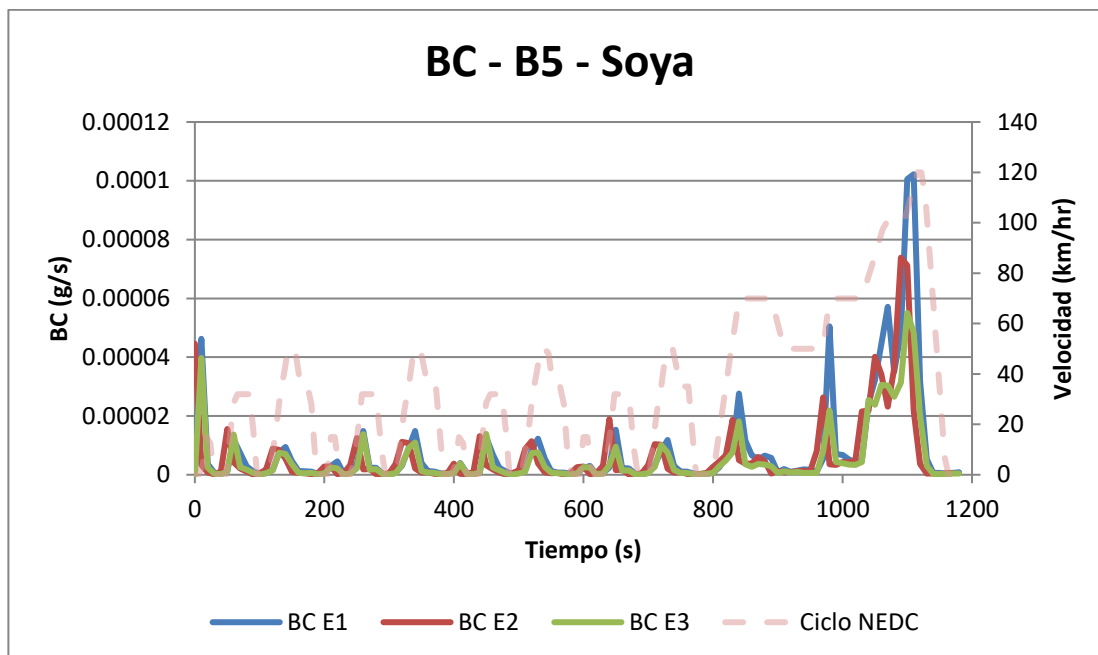


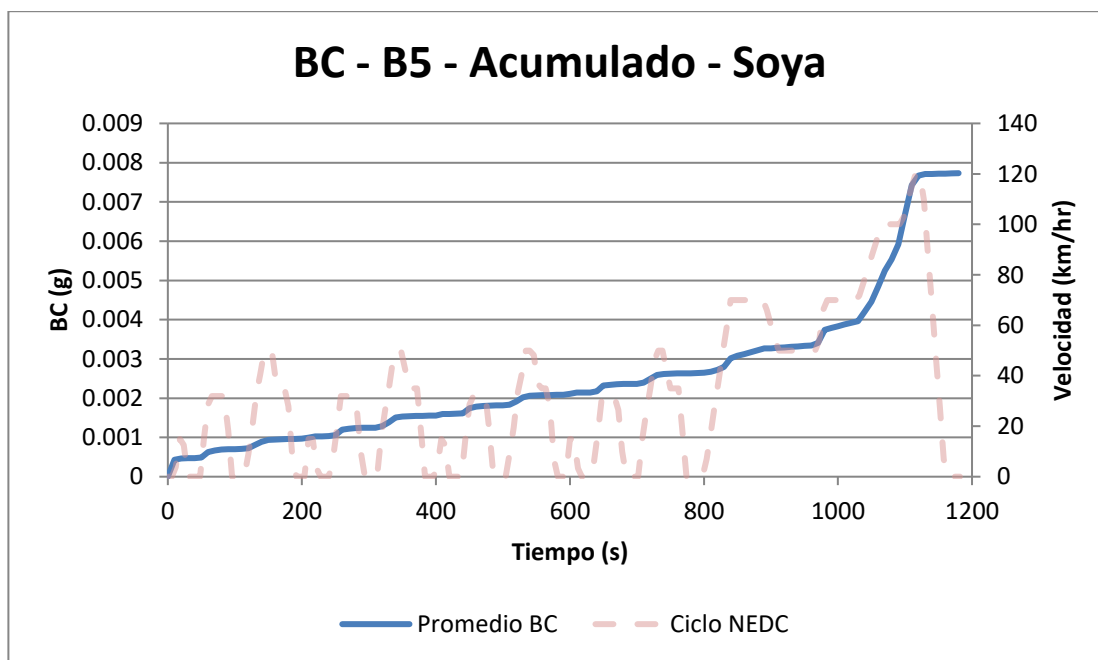
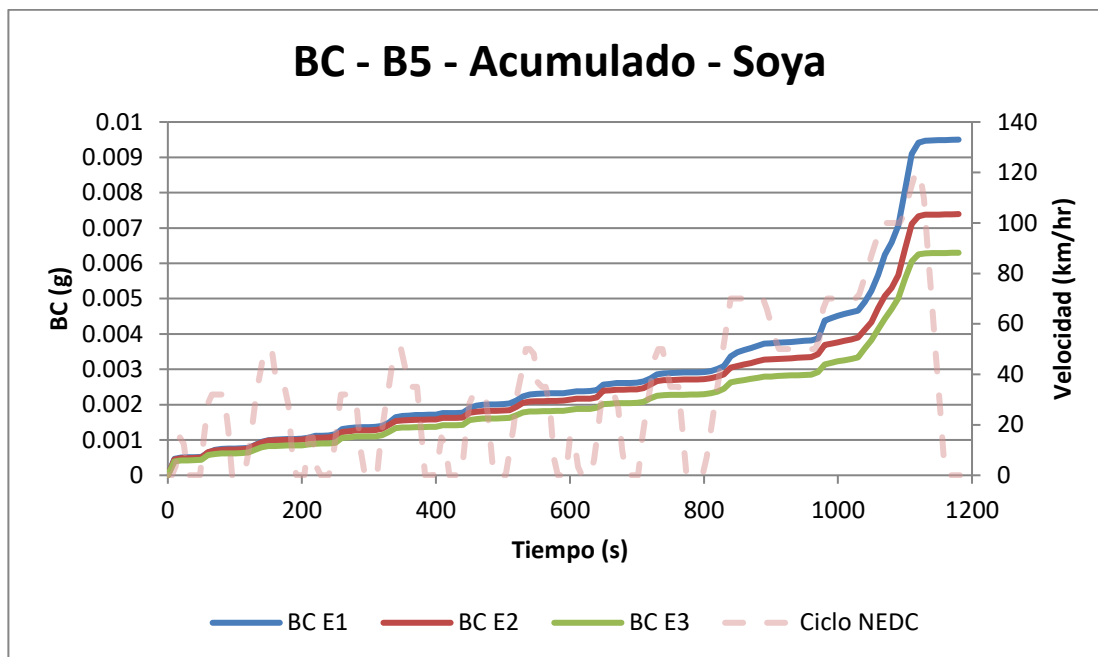


6.4.4 Aceite de soya, granulometría para distintas mezclas.





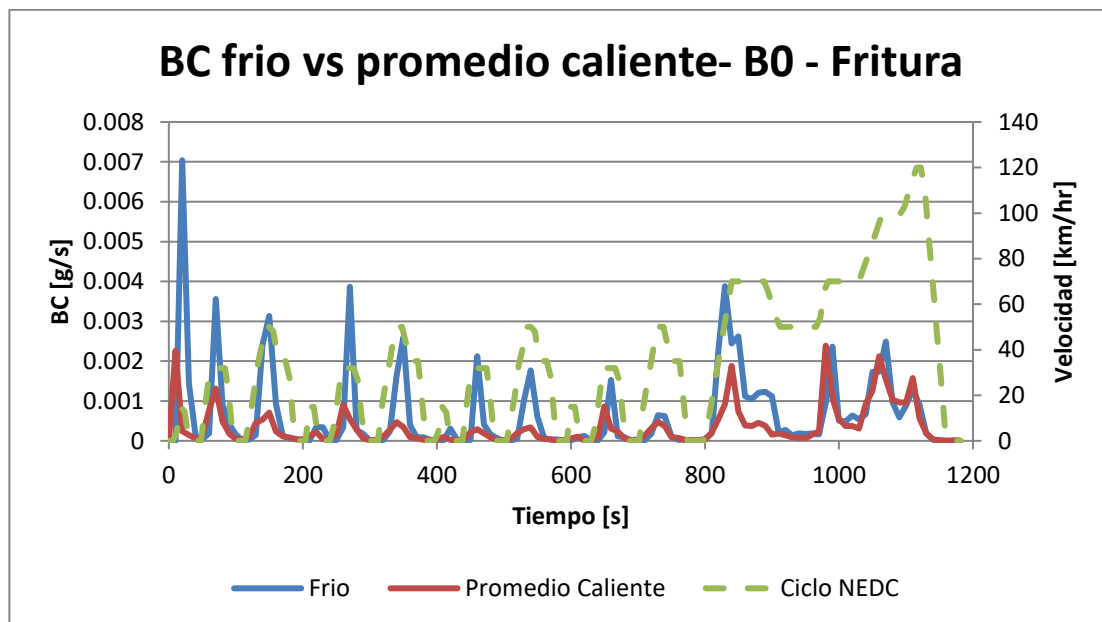


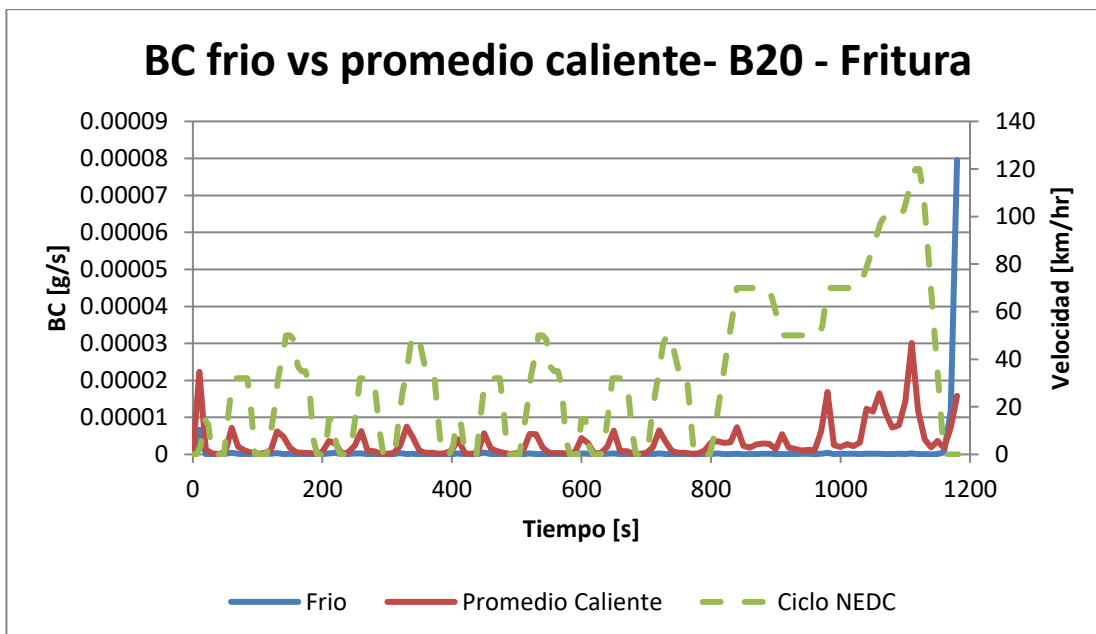
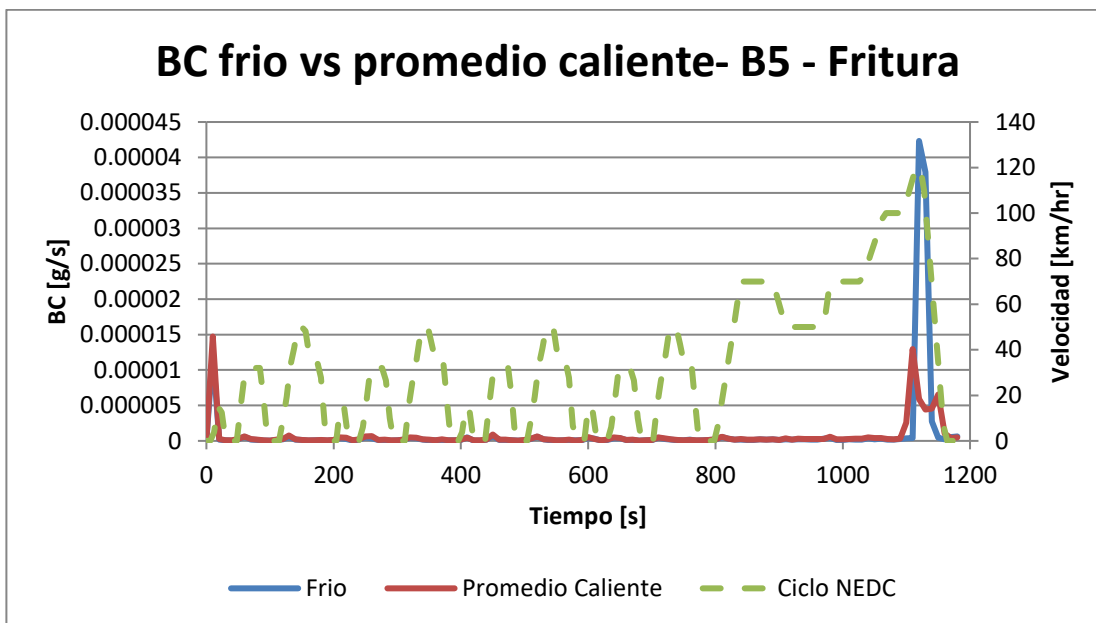


6.5 Anexo E – Comparación granulométrica partida en frio vs. promedio emisiones BC.

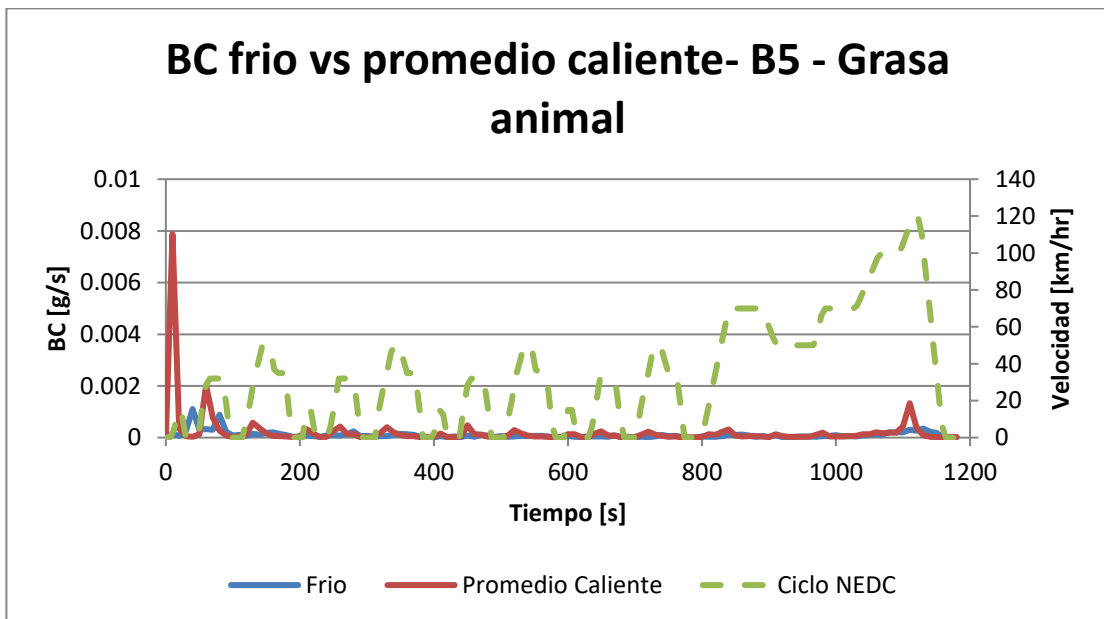
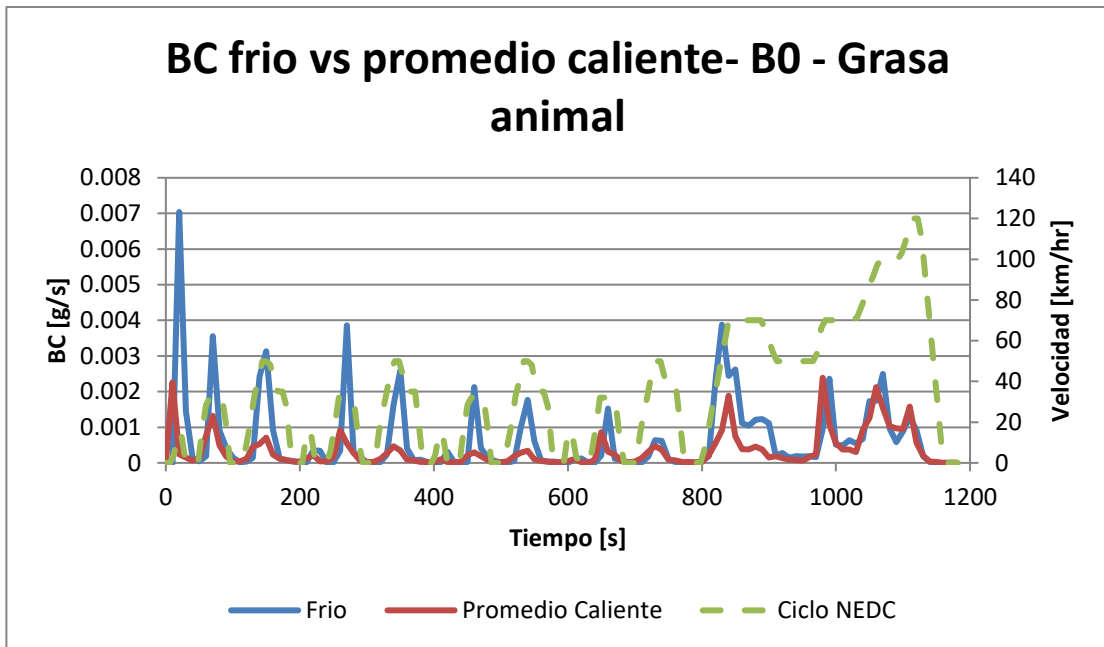
Comparación granulométrica de las partidas en frio y los promedios de las emisiones de BC para distintas mezclas.

6.5.1 Aceite de fritura: partida en frio vs. promedio emisiones BC por mezcla.

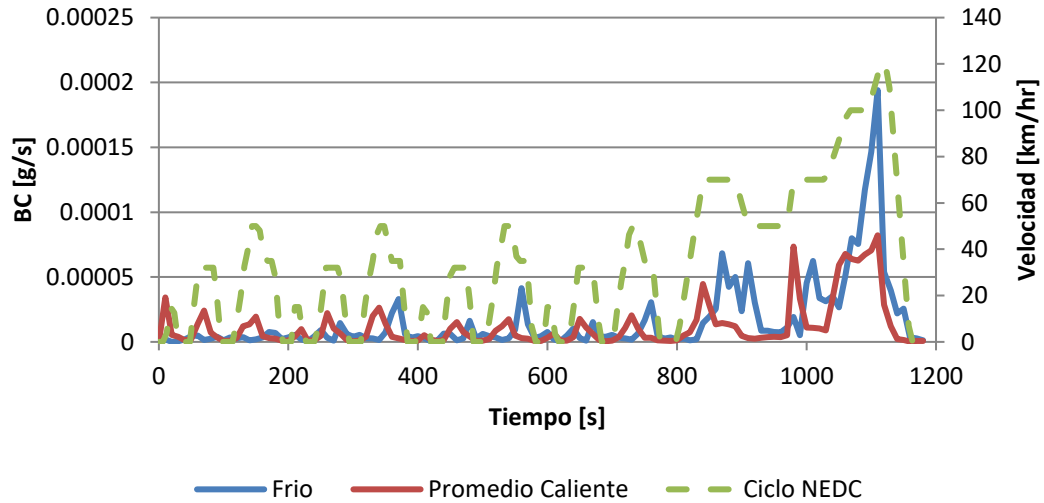




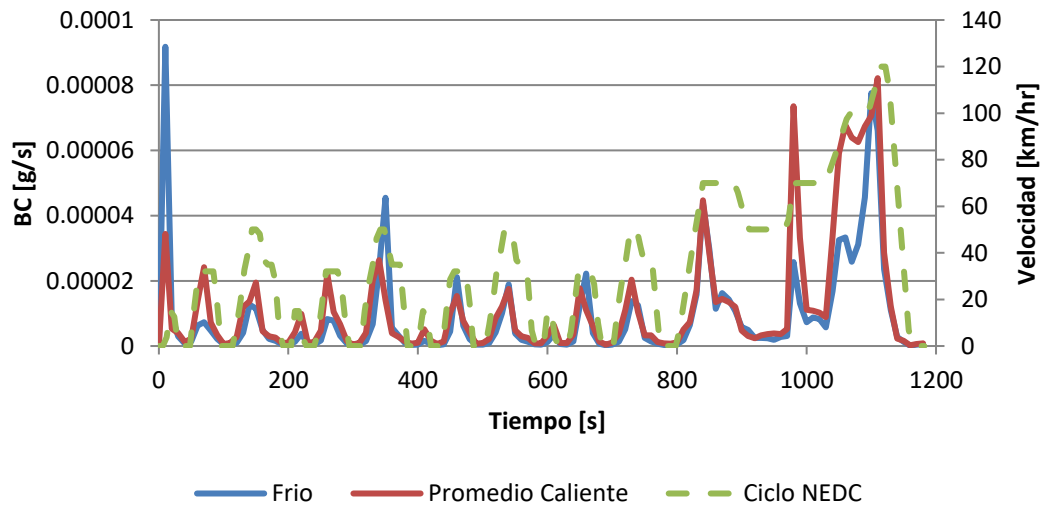
6.5.2 Grasa animal: partida en frio vs. promedio emisiones BC por mezcla.



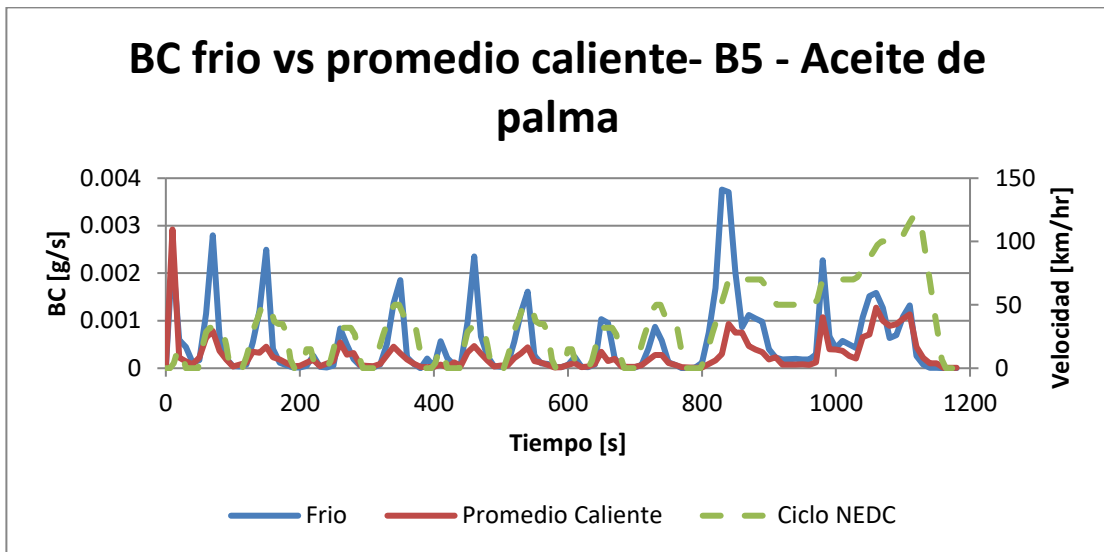
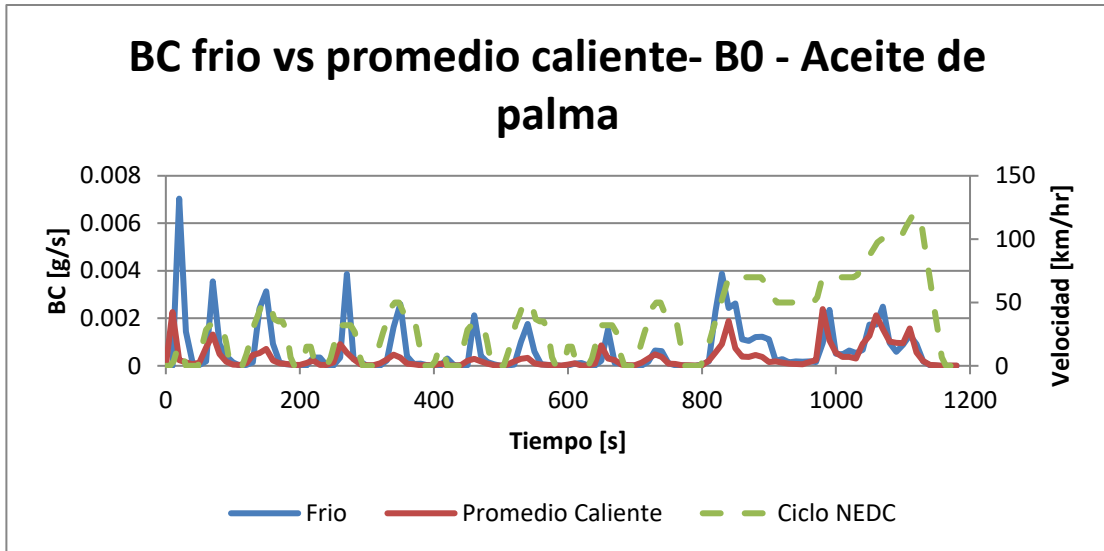
BC frio vs promedio caliente- B20 - Grasa animal



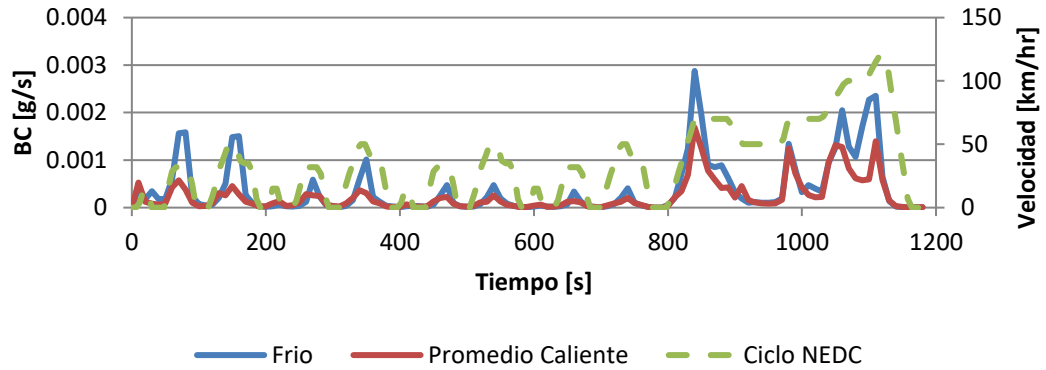
BC frio vs promedio caliente- B80 - Grasa animal



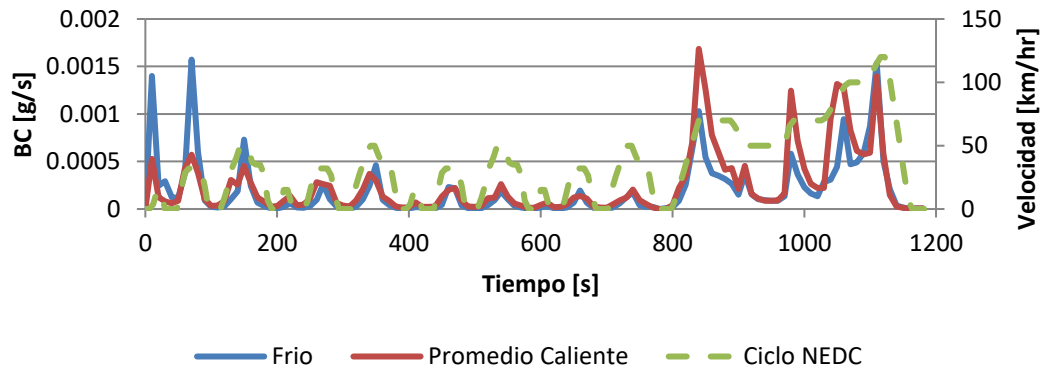
6.5.3 Aceite de palma: partida en frio vs. promedio emisiones BC por mezcla.



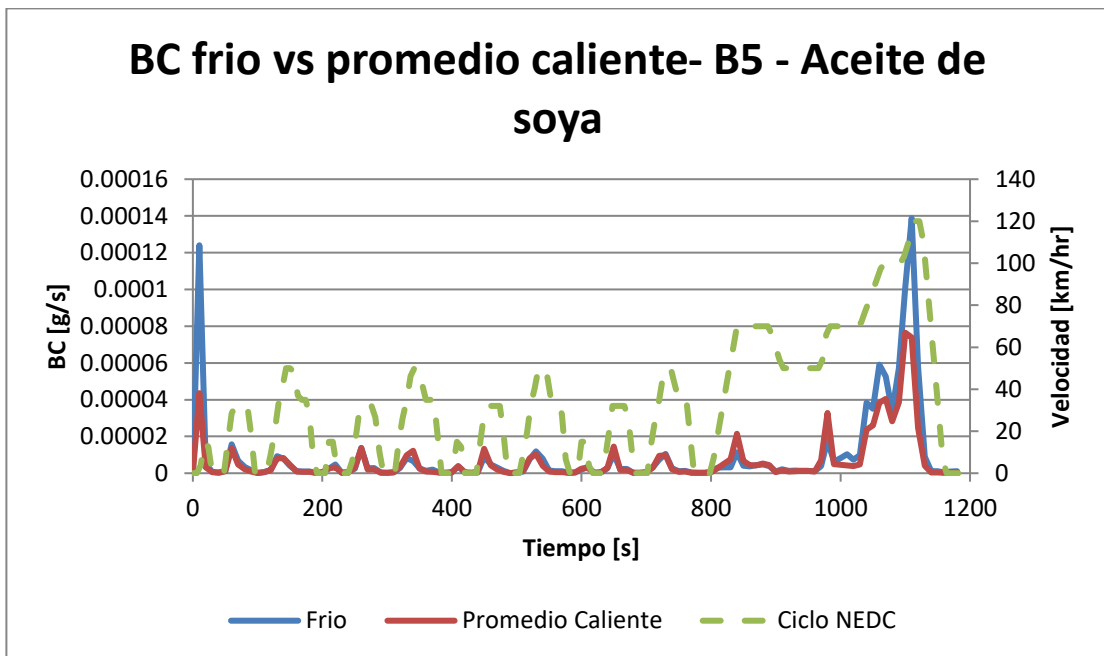
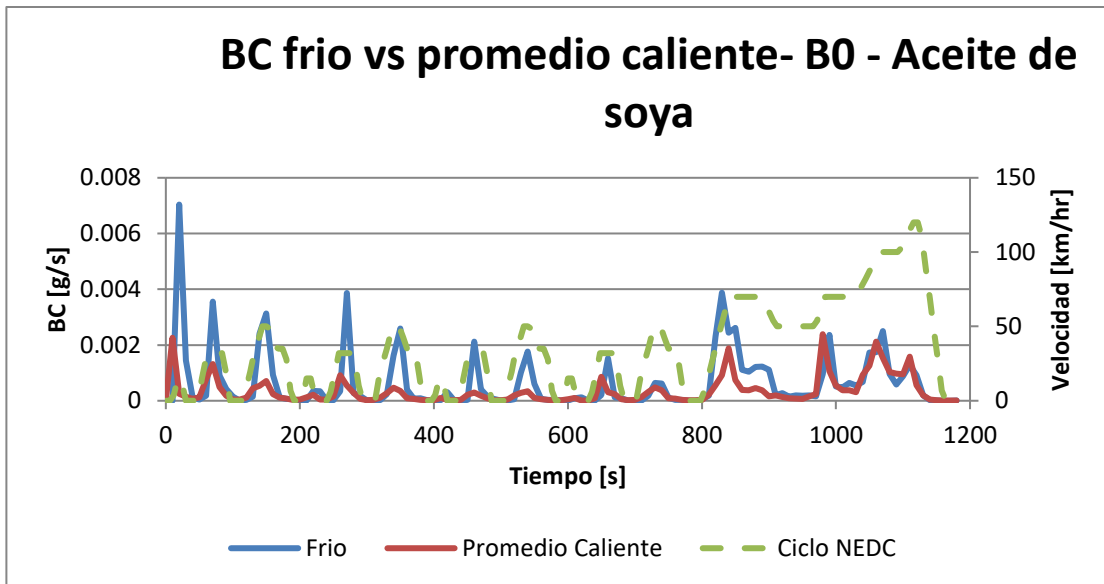
BC frio vs promedio caliente- B20 - Aceite de palma



BC frio vs promedio caliente- B80 - Aceite de palma



6.5.4 Aceite de soya: partida en frio vs. promedio emisiones BC por mezcla.

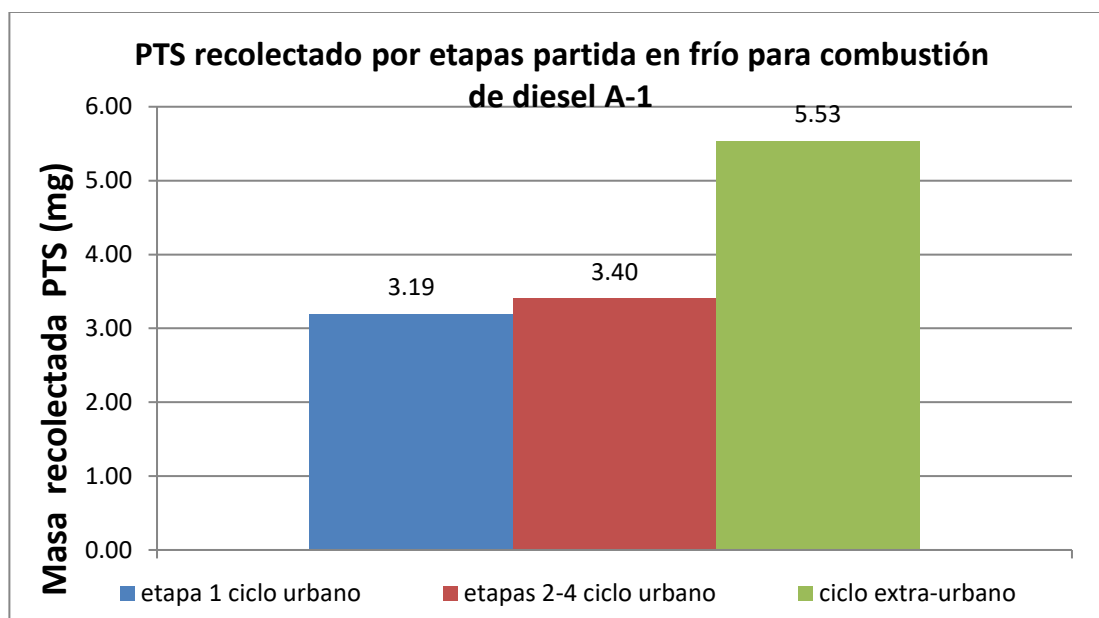


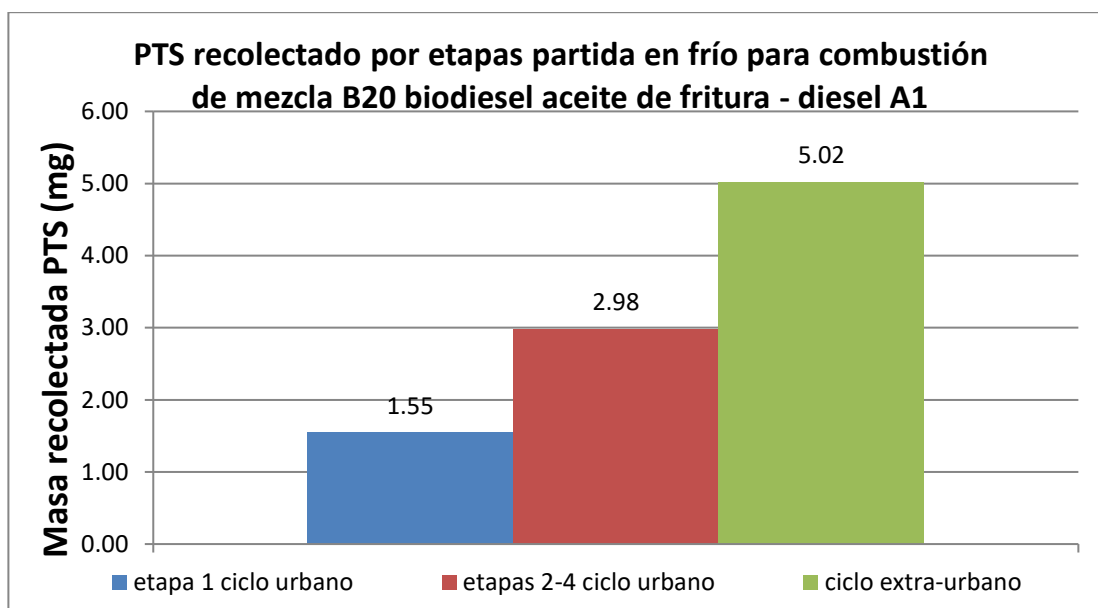
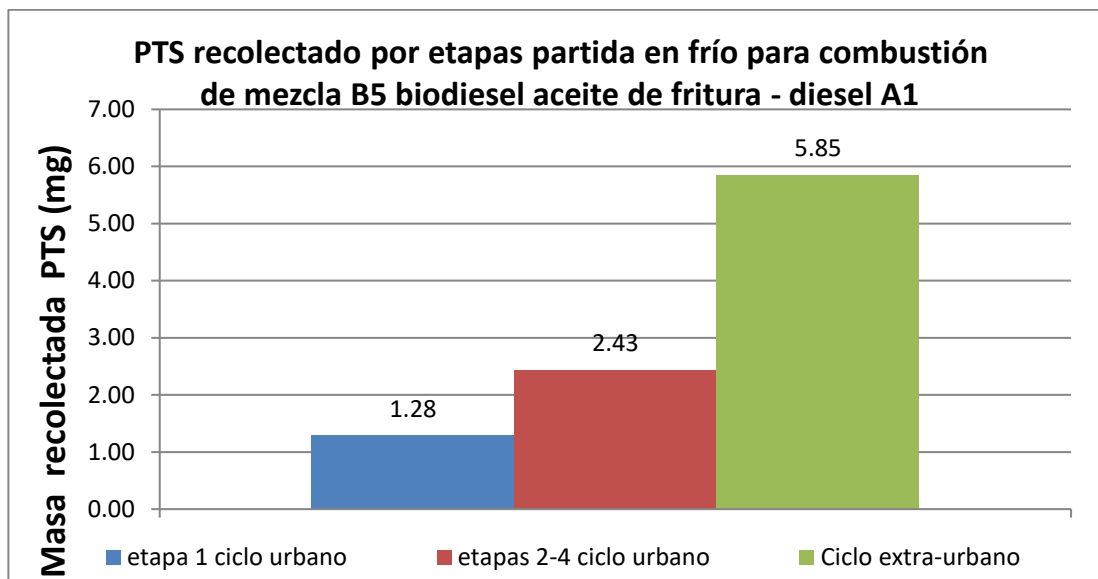
6.6 Anexo F – Resultados gravimétricos MP.

Tablas generadas por el método de gravimetría para los 4 biocombustibles. Se exponen los resultados restantes obtenidos que se adelantaron en el capítulo 3.1.2.

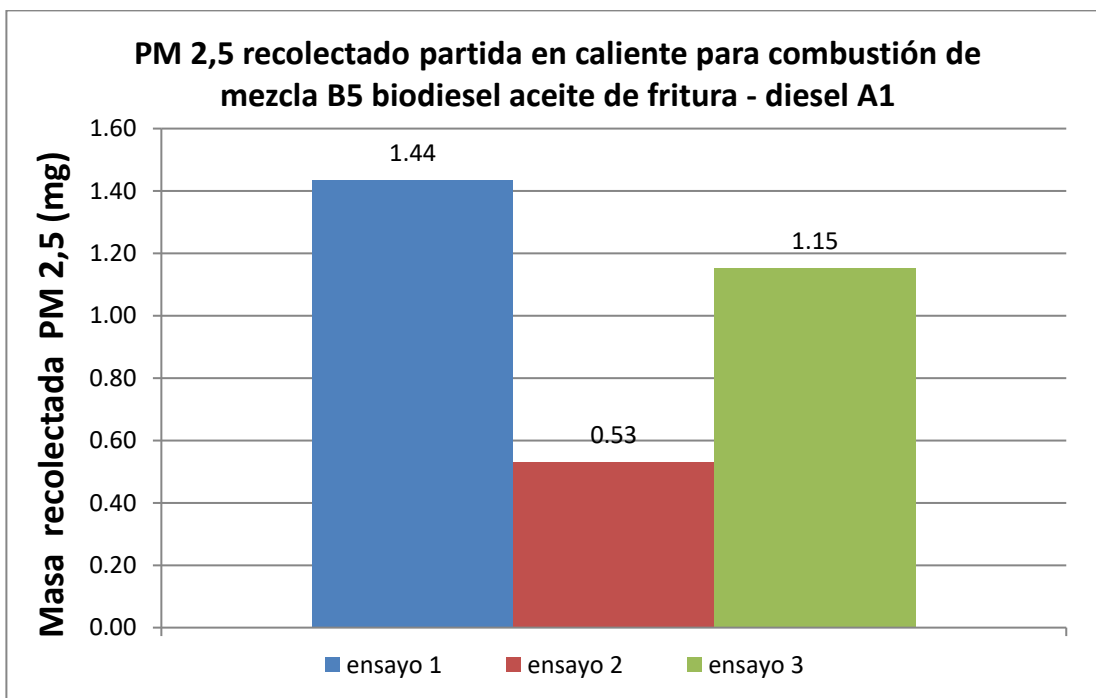
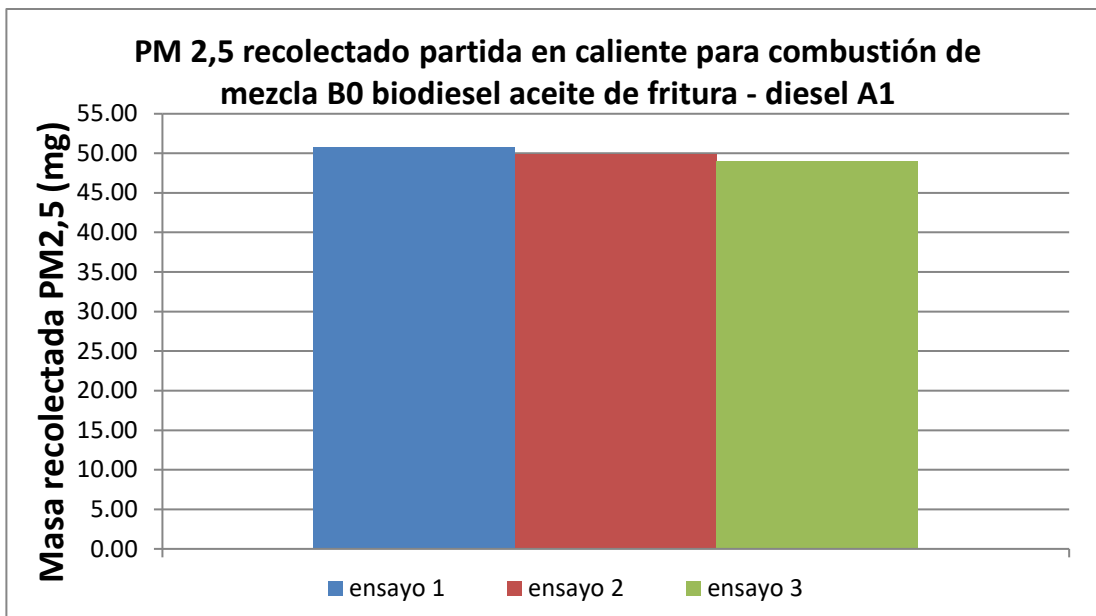
6.6.1 Biocombustible Fritura.

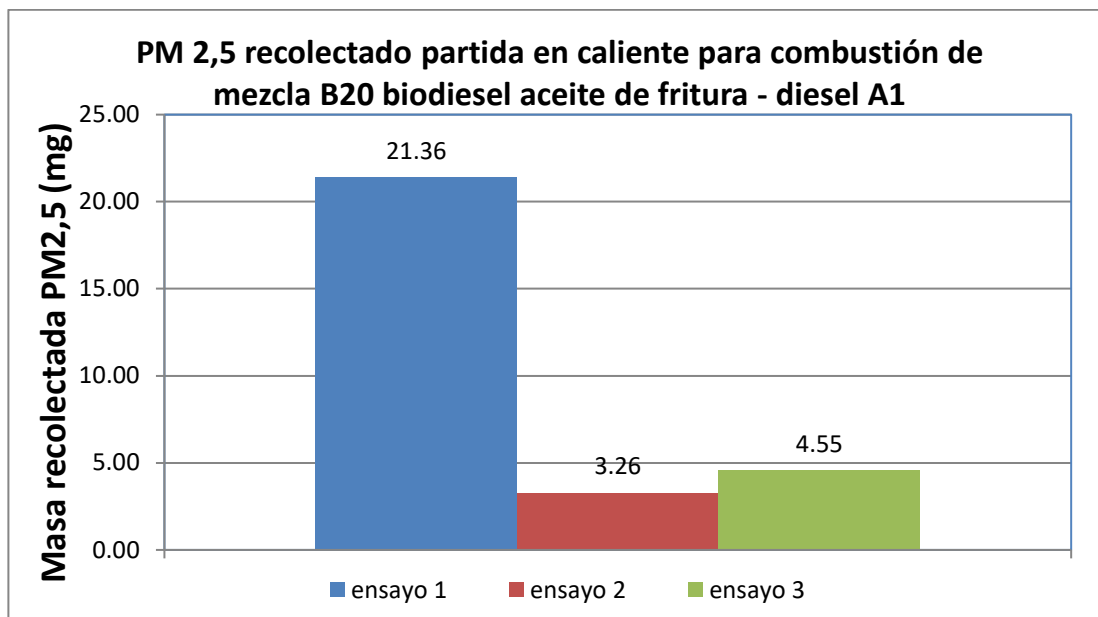
Resultados partículas totales en suspensión para partidas en frío en distintas mezclas.



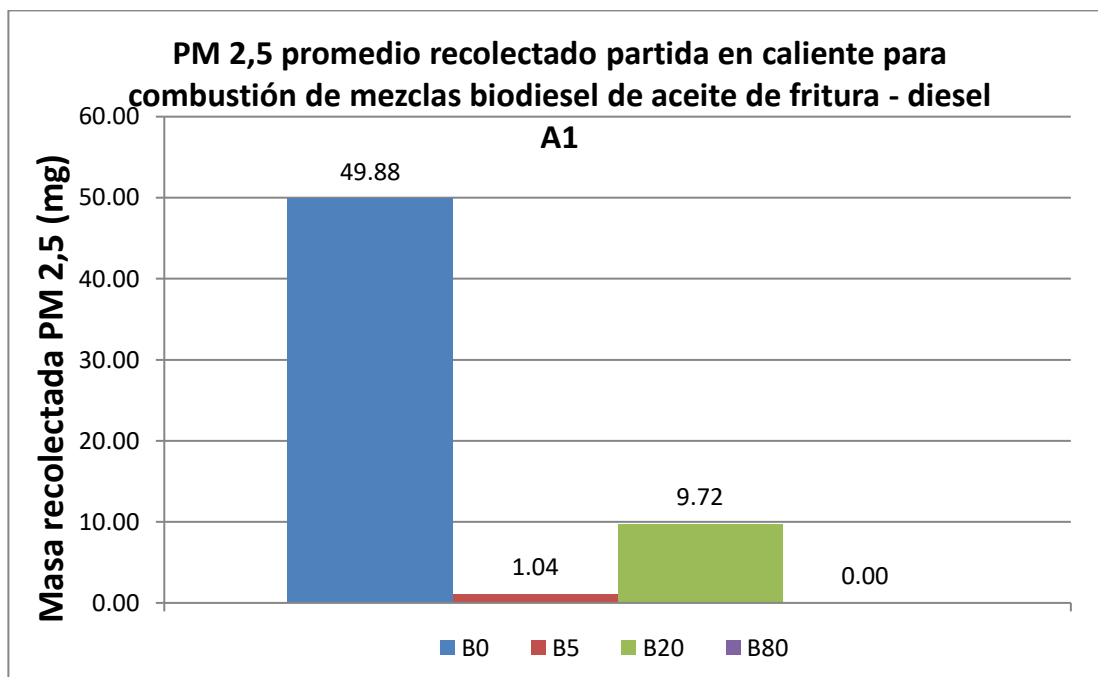


Resultados PM 2,5 μm para partidas en caliente en distintas mezclas.

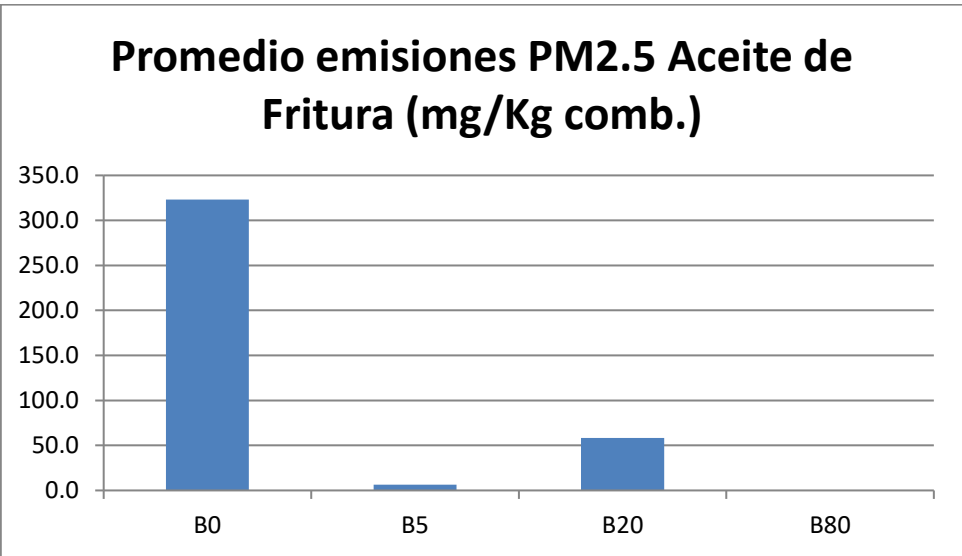
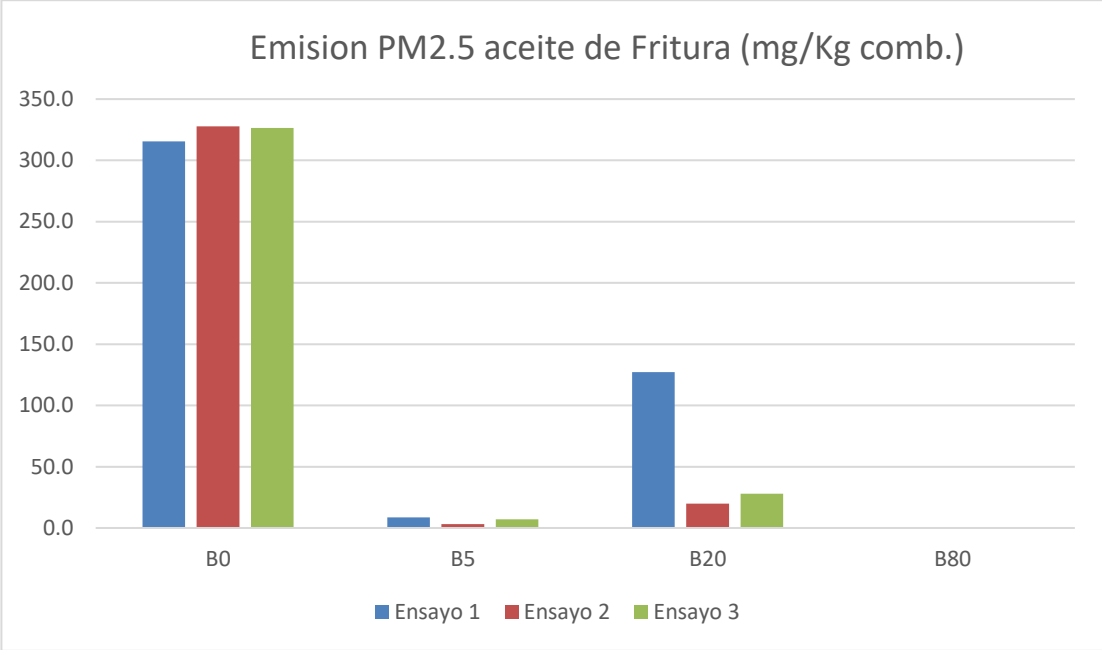




Resultados promedio PM 2,5 μ m para partidas en caliente en distintas mezclas.

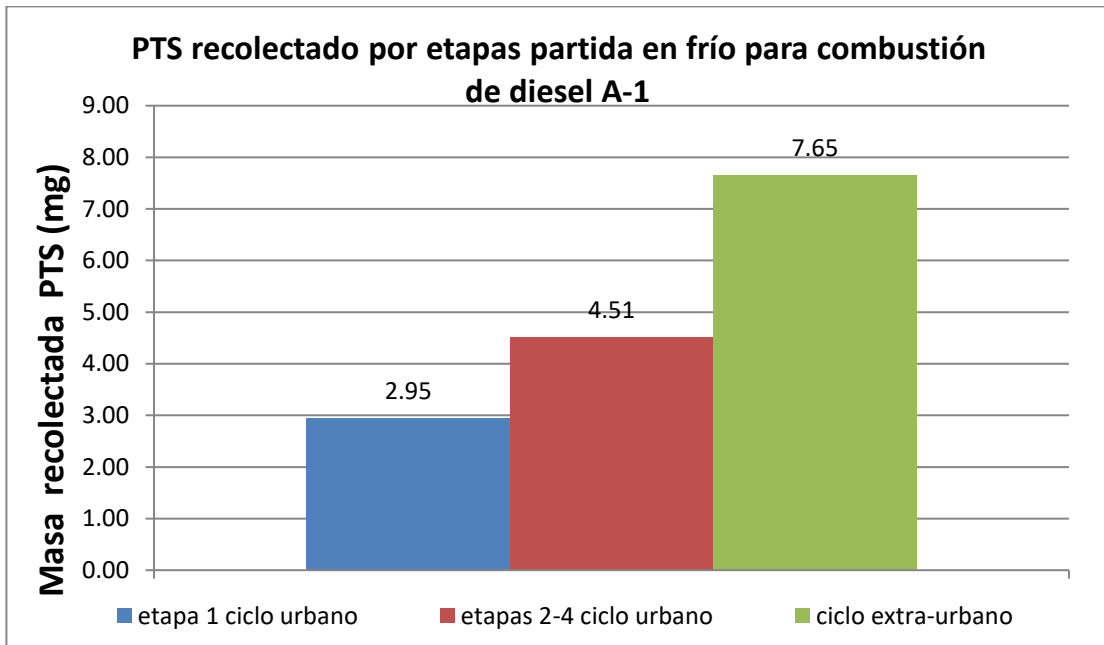


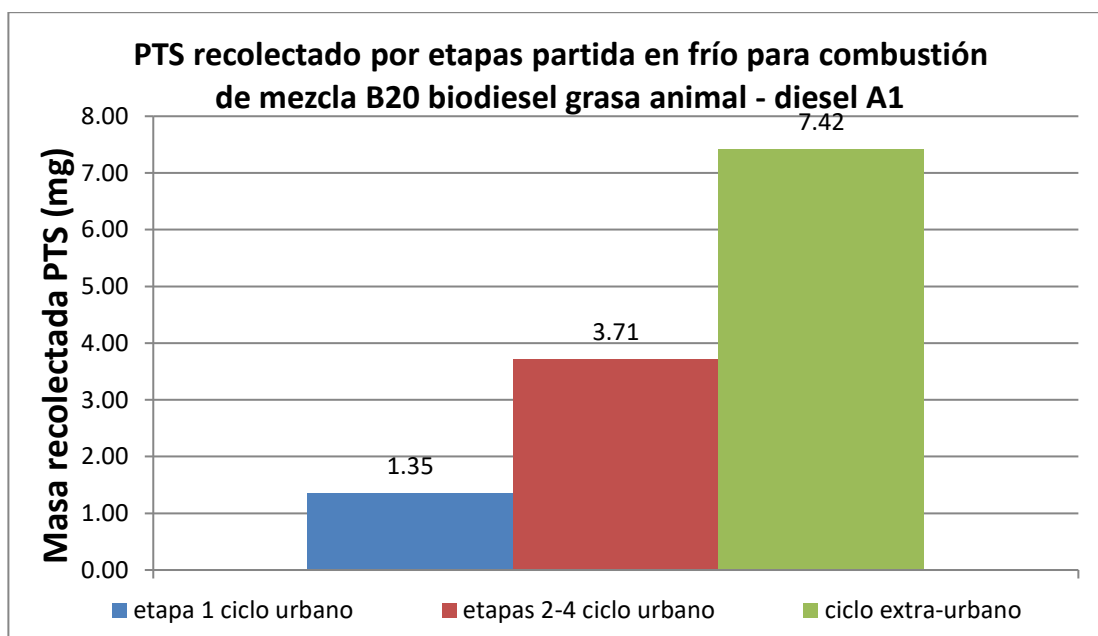
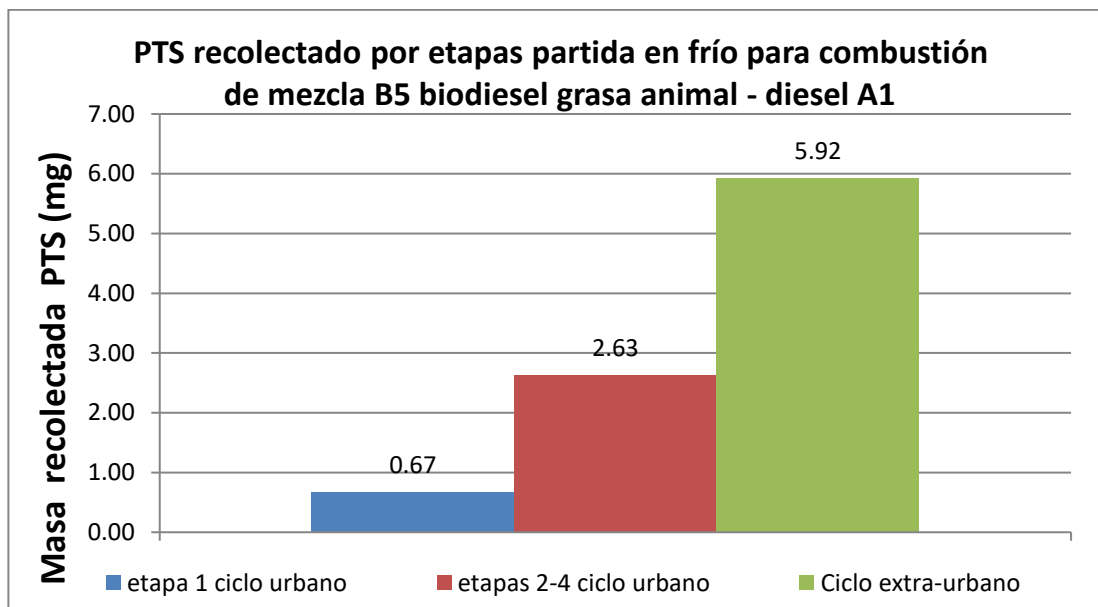
Emisiones mg/Kg combustible ensayos y promedio PM 2,5 µm para partidas en caliente en distintas mezclas.

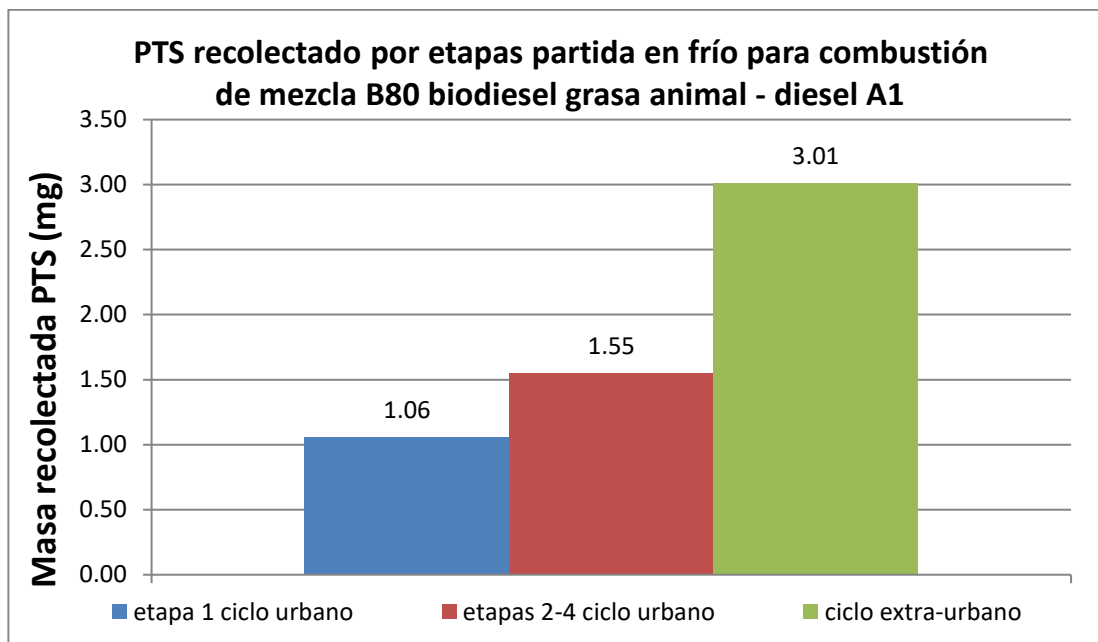


6.6.2 Biocombustible Grasa Animal.

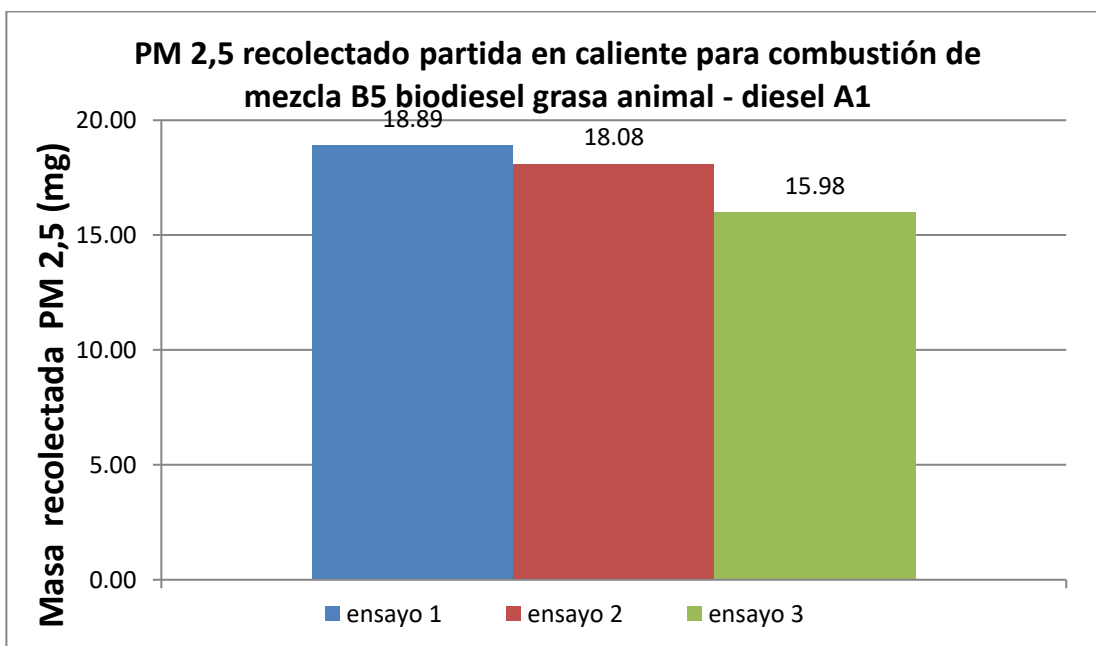
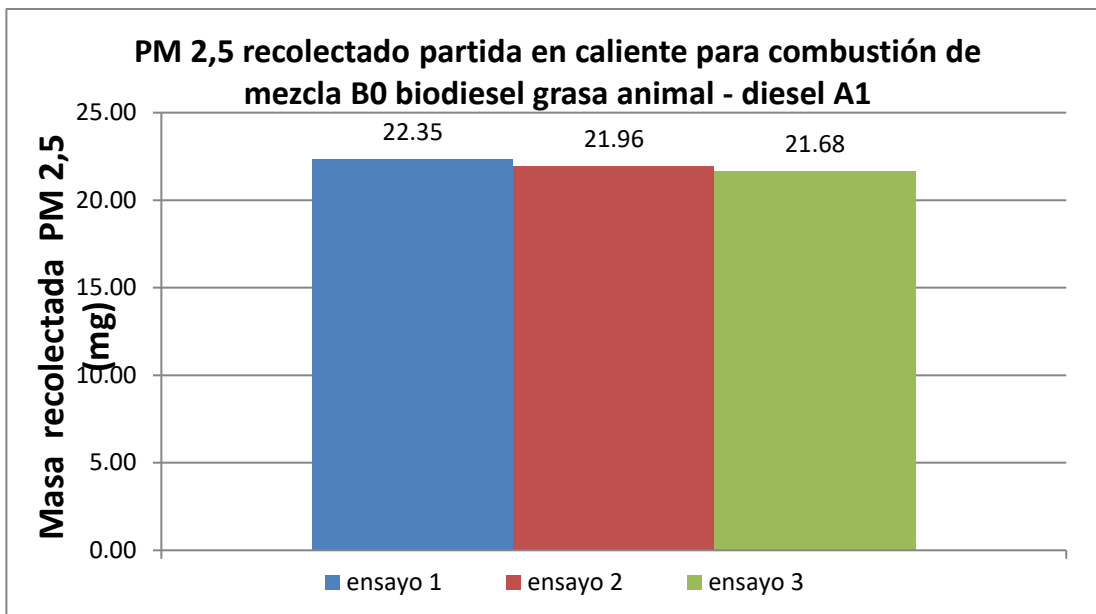
Resultados partículas totales en suspensión para partidas en frío en distintas mezclas.

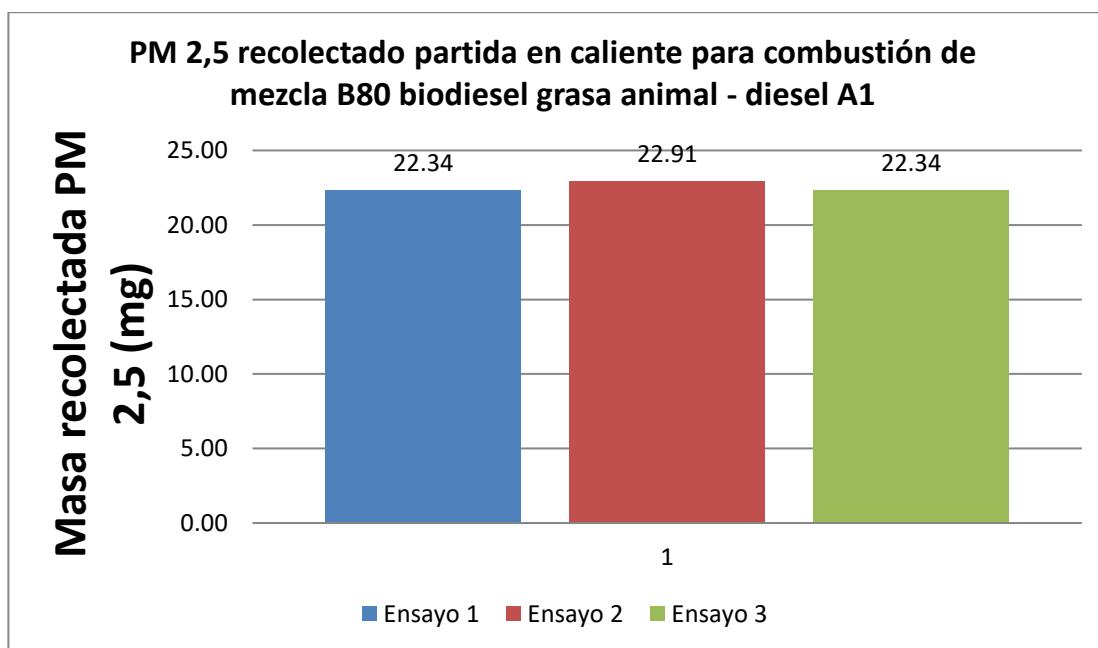
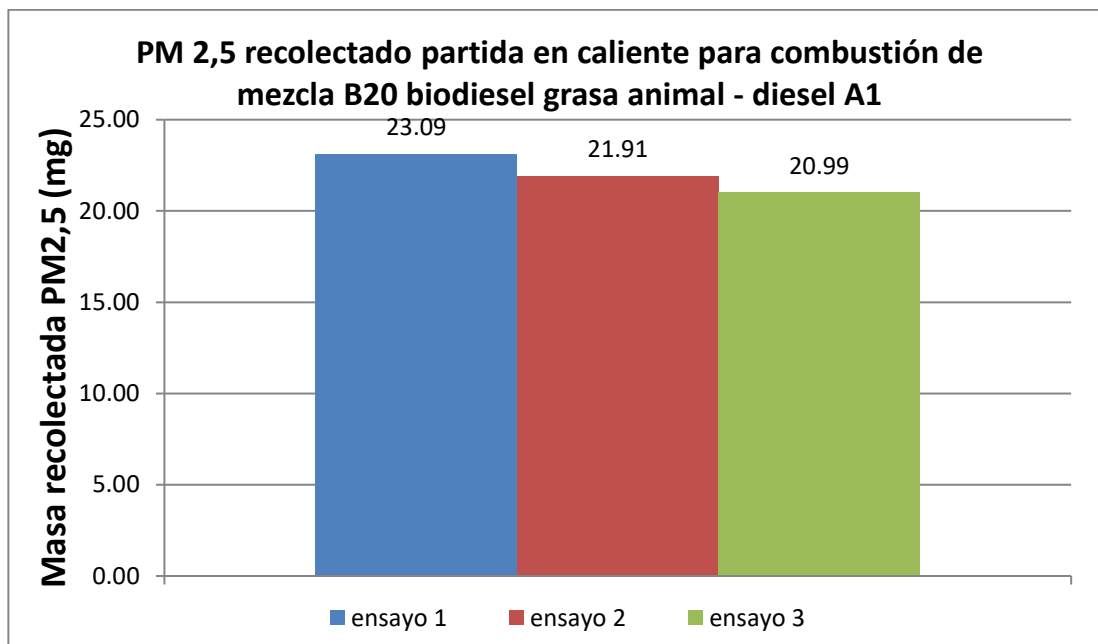




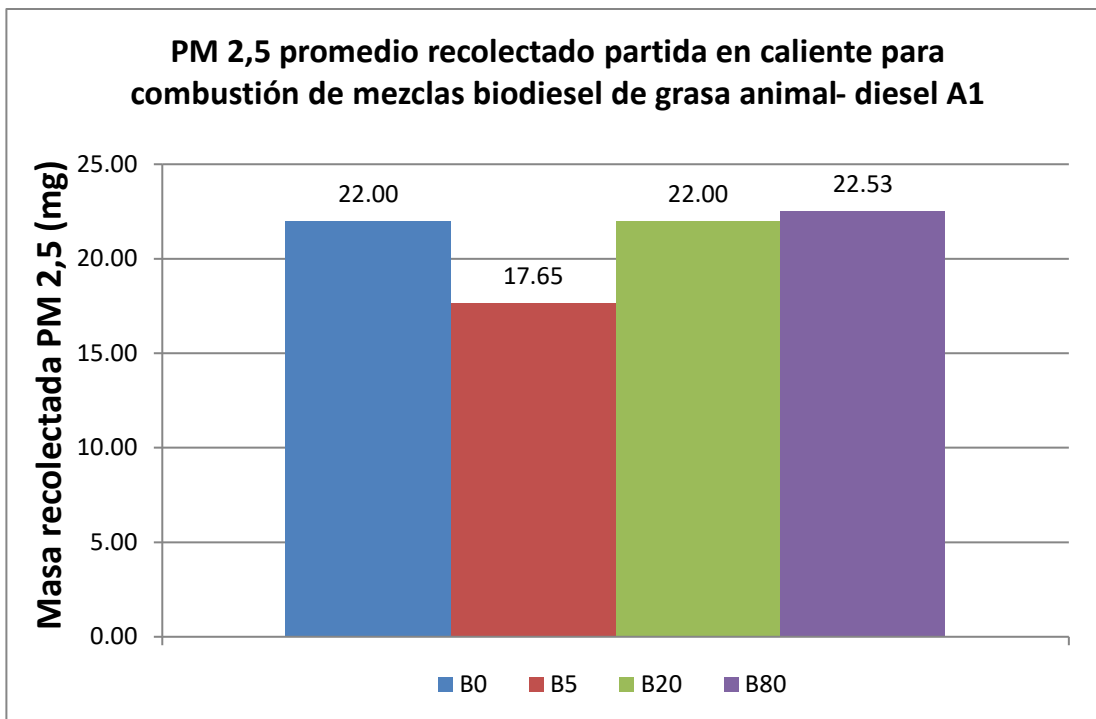


Resultados PM 2,5 μm para partidas en caliente en distintas mezclas.

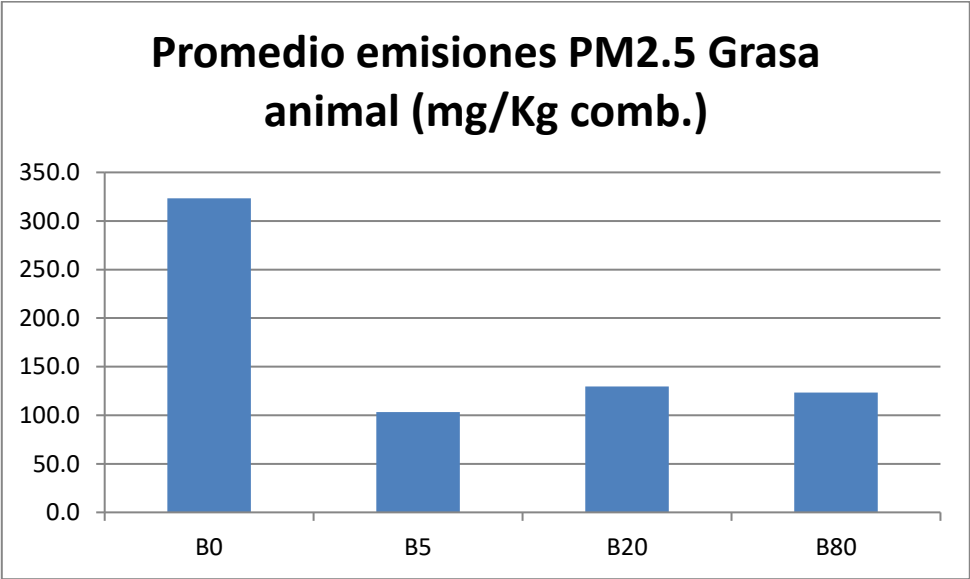
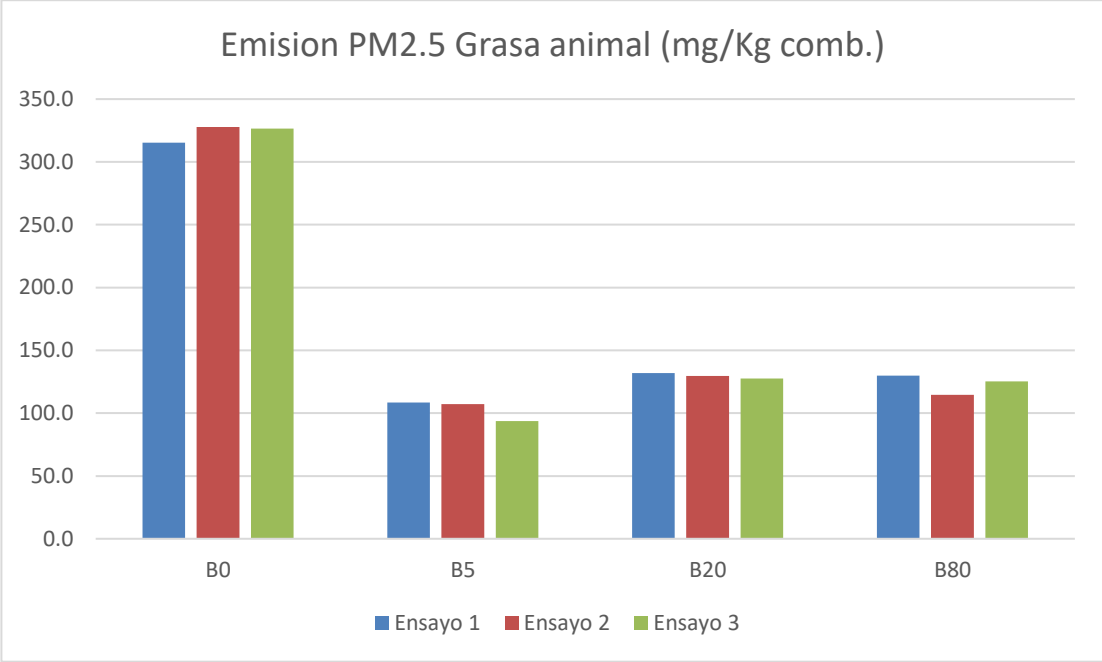




Resultados promedio PM 2,5 μm para partidas en caliente en distintas mezclas.

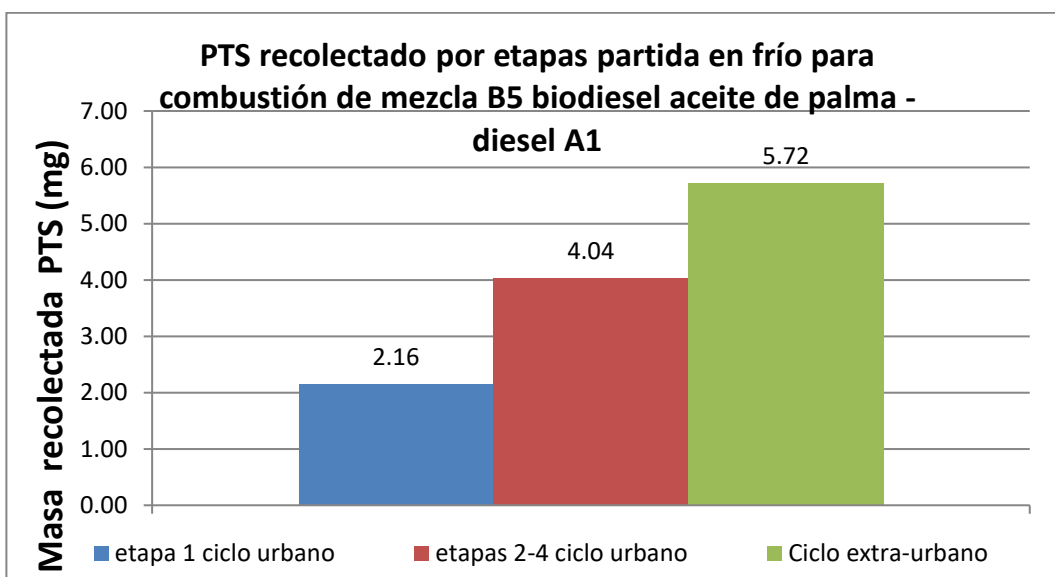
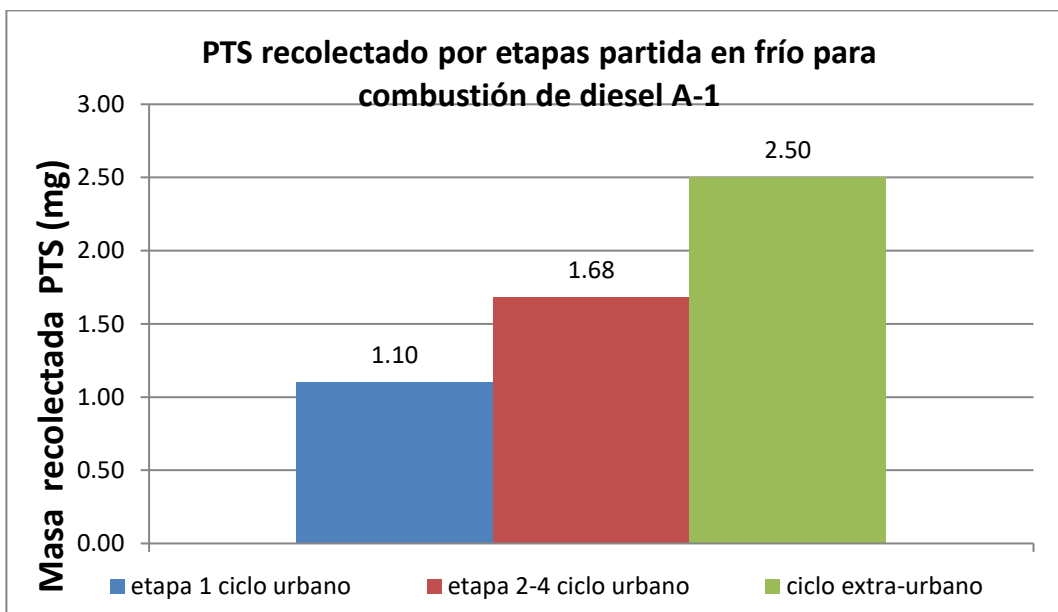


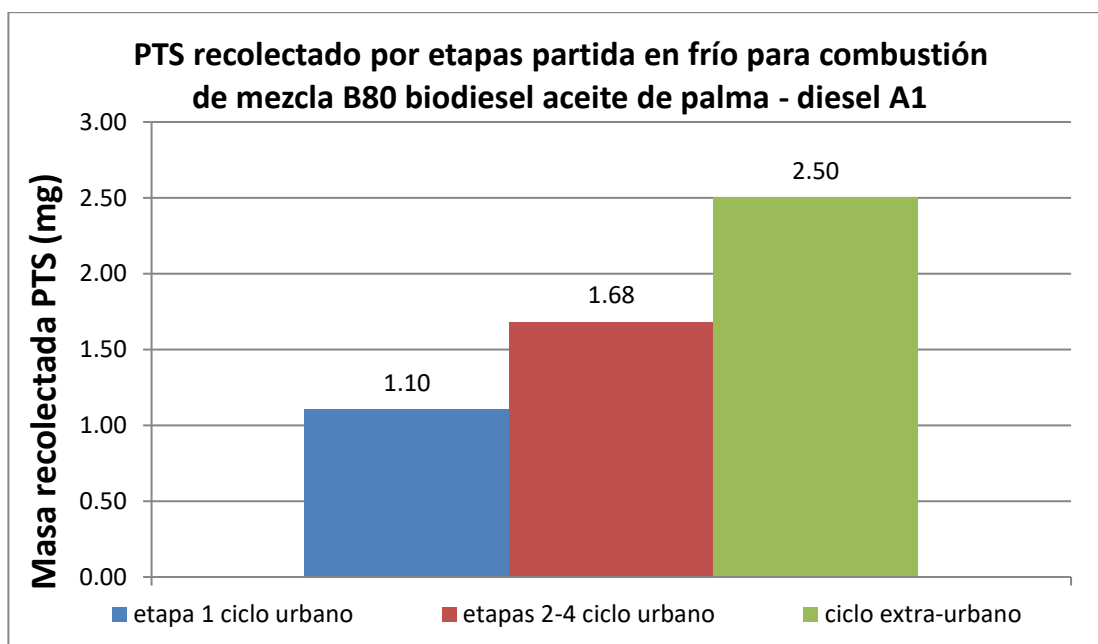
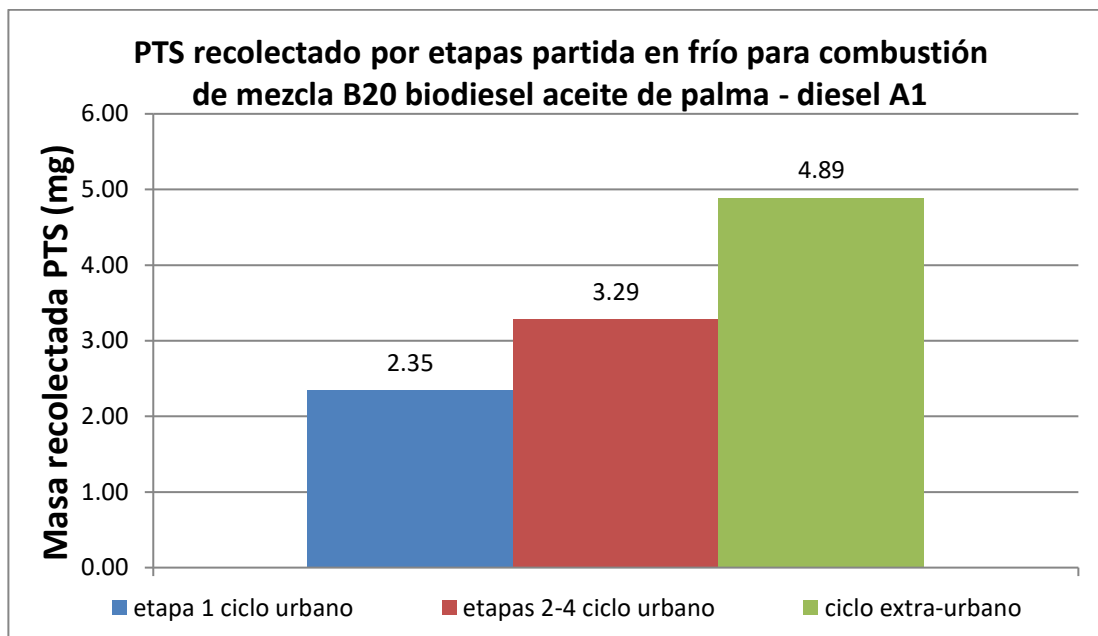
Emisiones mg/Kg combustible ensayos y promedio PM 2,5 µm para partidas en caliente en distintas mezclas.



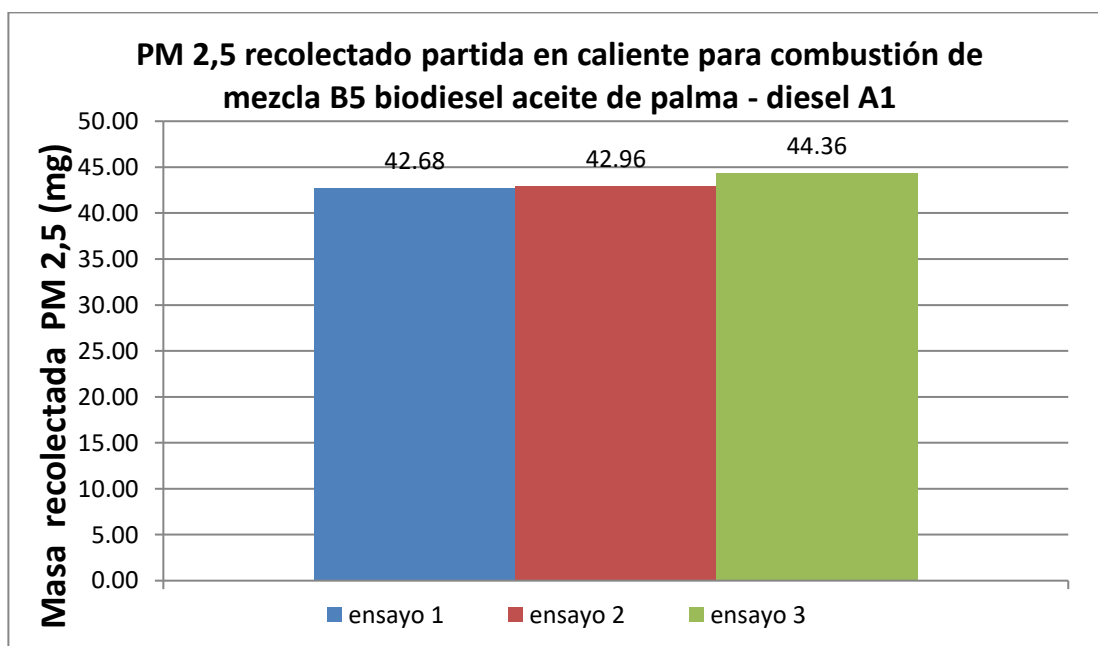
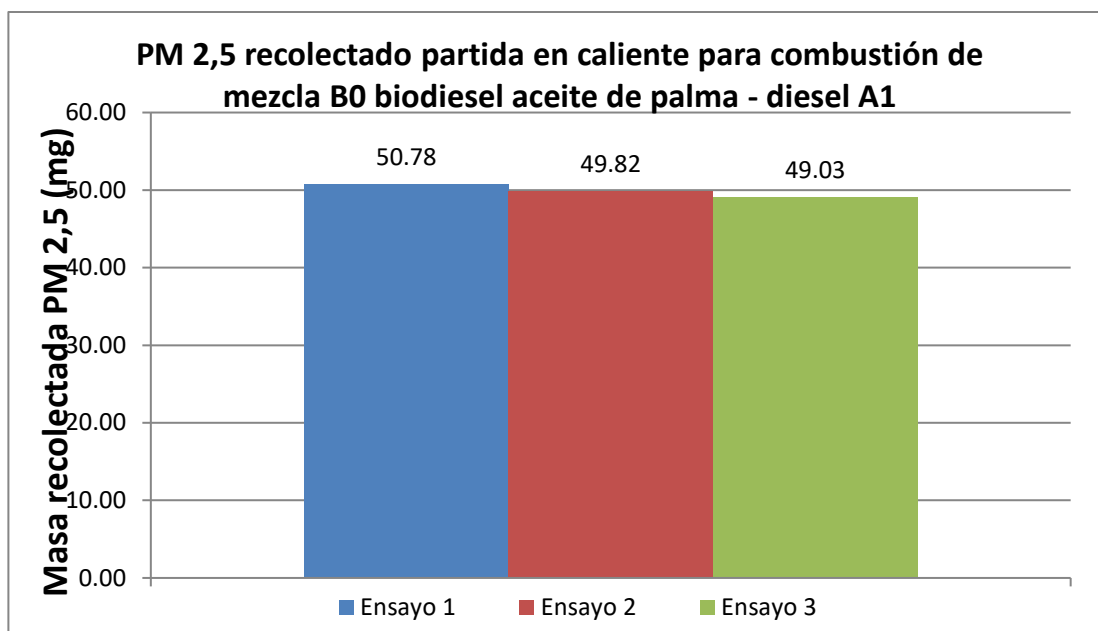
6.6.3 Biocombustible Aceite de Palma.

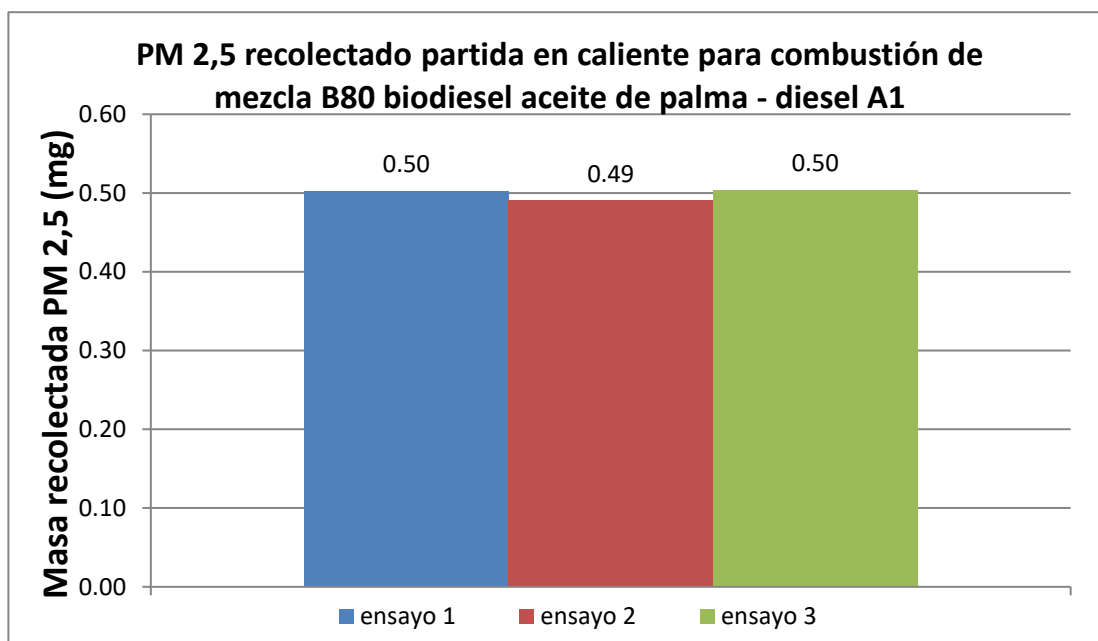
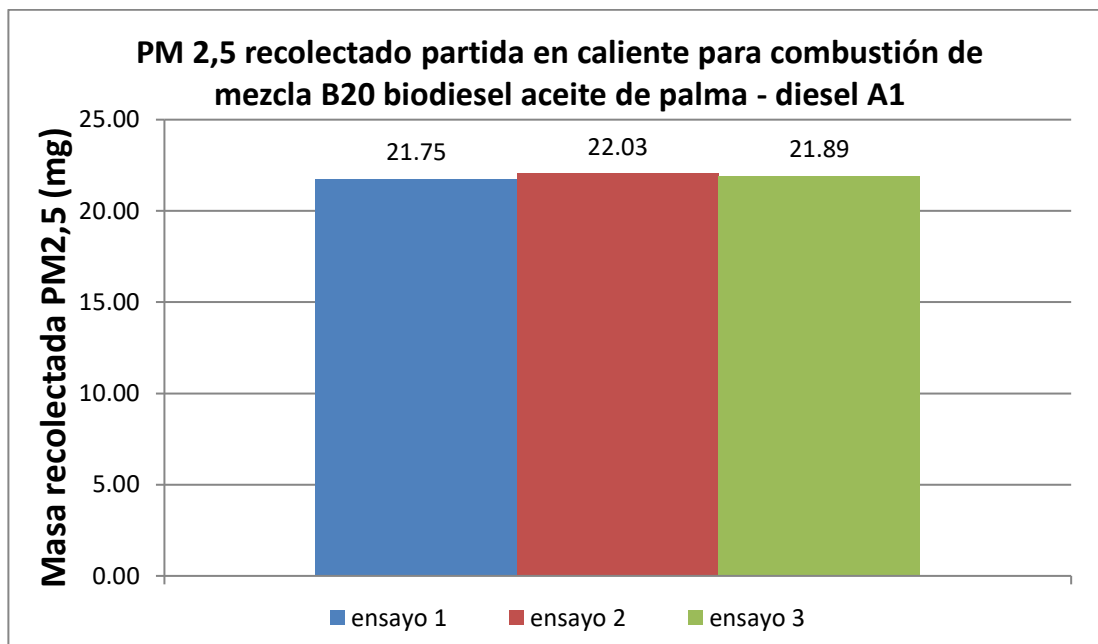
Resultados partículas totales en suspensión para partidas en frío en distintas mezclas.



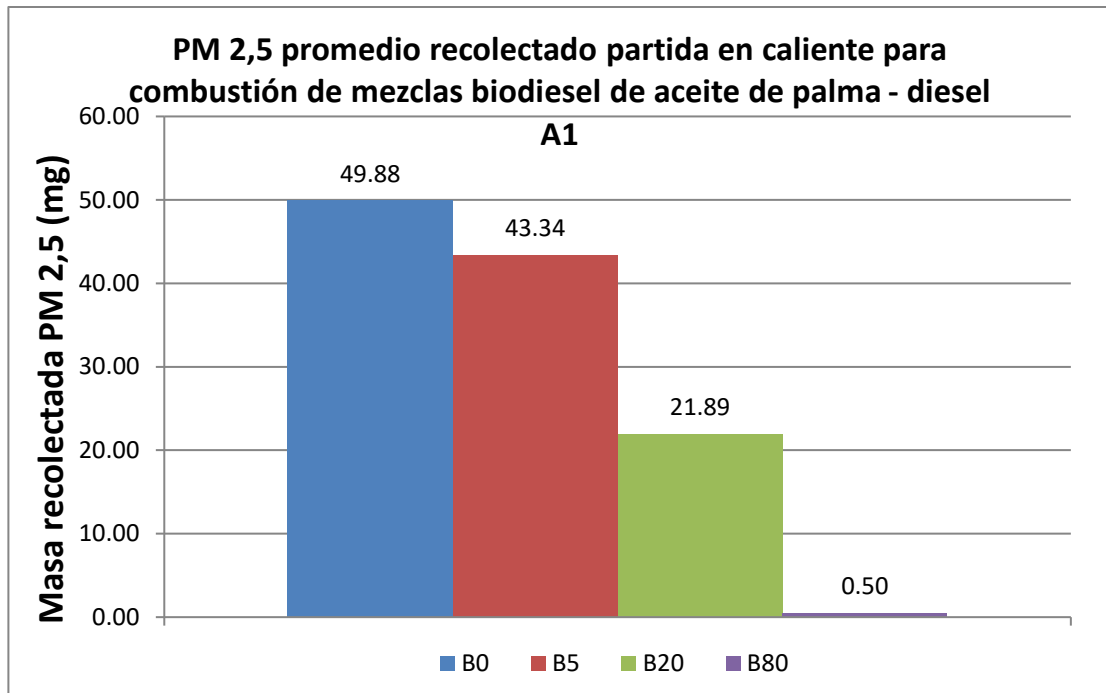


Resultados PM 2,5 μm para partidas en caliente en distintas mezclas.

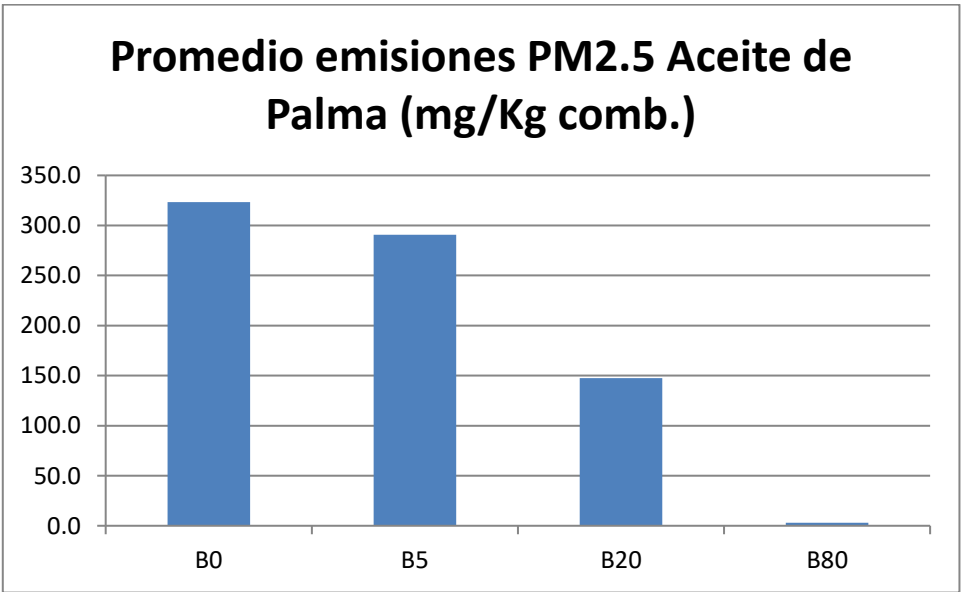
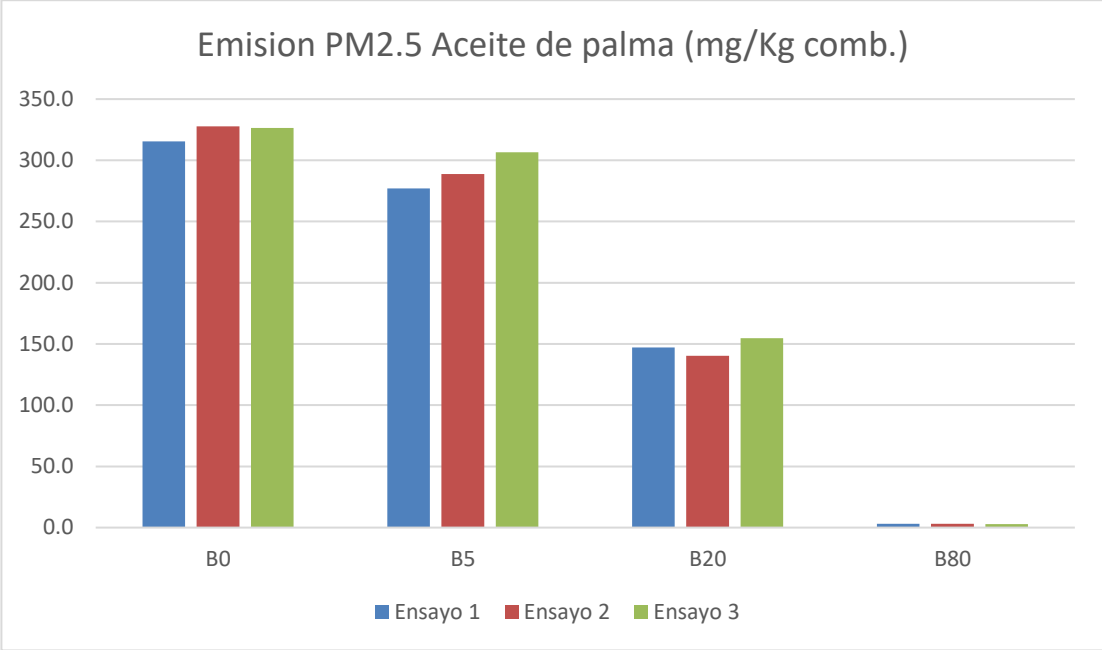




Resultados promedios PM 2,5 μm para partidas en caliente en distintas mezclas.



Emisiones mg/Kg combustible ensayos y promedio PM 2,5 µm para partidas en caliente en distintas mezclas.



6.6.4 Biocombustible Soya.

No existe data para este biocombustible