



# INECC

INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO

## “Caracterización de las emisiones de fuentes móviles fuera de carretera con motor diésel en México con y sin filtro de partículas”



# 2014

**Coordinación General de  
Contaminación y Salud  
Ambiental**

**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



Periférico Su, No. 5000, Col. Insurgentes  
Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F., C.P.04530.  
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55)54245404.  
[www.inecc.gob.mx](http://www.inecc.gob.mx)

**Caracterización de las emisiones de fuentes  
móviles fuera de carretera con motor diésel  
en México con y sin filtros de partículas**

**Informe Técnico**

**Final**

**2014**

**LTMCE<sup>2</sup>**  
LTM Center for  
Energy and the Environment

## DIRECTORIO

**Dra. María Amparo Martínez Arroyo**

Directora General del INECC

**Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa**

Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

**Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor**

Director de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos de Vida Corta

**M. en C. José Andrés Aguilar Gómez**

Subdirector de Modelos e Inventarios de Emisiones

## COLABORACIÓN:

LTM Center for Energy and the Environment (LTMCE2):

<http://www.ltmce2.org>

**Dra. Luisa T. Molina**

Directora General

**Dr. Miguel Zavala-Pérez**

Investigador

**Dr. Rodrigo González Abraham**

Investigador

D. R. © Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Periférico Sur 5000. Col Insurgentes Cuicuilco

C. P. 04530. Delegación Coyoacán, México D. F.

<http://www.inecc.gob.mx>

## **INSTITUCIONES PARTICIPANTES**

LTM Center for Strategic Studies in Energy and the Environment

Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México

Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz, Tecnológico de Monterrey (campus Toluca)

California Air Resources Board

Planta de Asfalto del Distrito Federal

Geo-Construcción, Mexico, D.F.

Sistema Maíz, Mexico, D.F.

Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

## **GRUPO DE TRABAJO**

### **LTM Center for Energy and the Environment Molina Center for Energy and the Environment**

Luisa T. Molina  
Miguel Zavala  
Rodrigo González Abraham  
Jared Morante  
Marco Vinicio Balam (consultor)

### **Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático**

J. Víctor Hugo Páramo  
Sergio Zirath Hernández  
J. Andrés Aguilar  
Francisco Guardado

### **Tecnológico de Monterrey Campus Toluca**

José Ignacio Huertas  
Daniel Fernando Prato Sánchez

### **Universidad Nacional Autónoma de México**

Arón Jazcilevich  
José Manuel Hernández Solís  
Raúl Alexander Gutiérrez  
Agustín García  
Gerardo Ruíz Suárez

### **Planta de Asfalto del Distrito Federal**

Reyes Martínez Cordero  
Carlos Hansen  
Adoratriz López  
Rodrigo Díaz  
Gregorio Gallardo  
José Mariano Plascencia Barrios

### **Sistema Maíz**

Efraín Bravo Camacho  
Antonio Nava

## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto fue coordinado y ejecutado por el LTM Center for Energy and the Environment (LTMCE2) con la participación y colaboración del Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA-UNAM), el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey campus Toluca y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Estamos sumamente agradecidos con la California Air Resources Board (CARB) por el préstamo del instrumento AVL-MSS para la realización de este proyecto. Un agradecimiento muy especial al Lic. José Mariano Plascencia Barrios, Director General de la Planta de Asfalto del Gobierno del Distrito Federal, al Ing. Reyes Martínez Cordero, Subdirector de Producción de la misma Planta de Asfalto del Distrito Federal y sus amables colaboradores por su participación decisiva y siempre propositiva durante la realización de este proyecto. Agradecemos también a la compañía Geo Construcción, y el Sr. Antonio Nava de la "Asociación Sistema Maíz" del Distrito Federal, por su amable apoyo y colaboración con sus vehículos fuera de carretera para las pruebas.

Este proyecto está co-financiado por United States Agency for International Development (USAID), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, y el Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment.

## ÍNDICE

<b>1. Resumen ejecutivo</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>12</b>
<b>4. Alcances y consideraciones</b> .....	<b>13</b>
<b>5. Metodología</b> .....	<b>14</b>
5.1 Procedimiento metodológico.....	15
5.2 Selección de los vehículos fuera de carretera para las pruebas .....	18
5.3 Plataformas portátiles de medición de emisiones .....	25
5.4 Planeación y organización del muestreo .....	27
<b>6. Resultados</b> .....	<b>33</b>
6.1 Muestreo de vehículos a diésel fuera de carretera sin dispositivo de control: creación de línea base .....	38
6.2 Muestreo de vehículos a diésel fuera de carretera con dispositivo de control .....	41
<b>7. Análisis de resultados</b> .....	<b>45</b>
<b>8. Conclusiones y sugerencias</b> .....	<b>47</b>
<b>9. Bibliografía</b> .....	<b>50</b>
Anexo 1.....	51
Anexo 2.....	65
Anexo 3.....	73
Anexo 4.....	77
Anexo 5.....	79
Anexo 6.....	83
Acrónimos.....	85

## **1. Resumen Ejecutivo**

Los vehículos a diésel fuera de carretera (por ejemplo, montacargas, vehículos especiales, generadores portátiles, y una amplia gama de otros equipos utilizados en la agricultura, la construcción y la industria) pueden ser una fuente importante de gases contaminantes y de partículas carbonáceas sub-micrométricas en muchas partes del mundo. La introducción de nuevas tecnologías de control de emisiones para vehículos a diésel fuera de carretera puede ser benéfica en el diseño de estrategias efectivas en México y en países en vías de desarrollo para la mitigación de las emisiones de carbono negro y otros contaminantes. El carbono negro es un contaminante perjudicial para la salud humana, y debido a sus importantes efectos climáticos es uno de los principales contaminantes climáticos de vida corta (CCVC). Debido a ello, los CCVC se han incluido como un componente clave en los planes de mitigación en la Estrategia Nacional de Cambio Climático de México.

Recientemente se encuentran disponibles en el mercado una gran variedad de tecnologías para el tratamiento de las emisiones de los vehículos a diésel diseñados para atrapar y finalmente destruir una parte importante de las emisiones de partículas de carbono negro provenientes de vehículos a diésel. Sin embargo, las emisiones de partículas emitidas por un vehículo a diésel dependen de muchos parámetros que varían en condiciones locales y reales de operación. Por lo tanto, para probar la eficacia de las tecnologías para el tratamiento de las emisiones se requiere del muestreo de una amplia gama de parámetros de operación de los vehículos diésel en condiciones reales de funcionamiento.

En este proyecto se llevó a cabo la caracterización del material particulado (PM) y de las emisiones gaseosas obtenidas con y sin la aplicación de las tecnologías disponibles de control de emisiones en condiciones reales de operación de vehículos a diésel fuera de carretera en México. Para la obtención de información sobre las emisiones (hidrocarburos, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM y carbono negro) y los parámetros de funcionamiento de los vehículos a diésel fuera de carretera se utilizaron de manera intercambiable Sistemas Portátiles de Mediciones de Emisiones (PEMS, por sus siglas en inglés) tales como el “AVL Micro-Soot Sensor”, el SEMTECH ECOSTAR, y el sistema AXION. Se realizaron las mediciones de los vehículos de prueba en condiciones reales de ciclos de operación completos con y sin dispositivos de control de emisiones. El proyecto se realizó en varias etapas, incluyendo:

- 
- a) Planeación y organización del muestreo
  - b) Selección y preparación de vehículos fuera de carretera para las pruebas
  - c) Adquisición de los dispositivos de control de emisiones
  - d) Configuración y calibración de los métodos de medición
  - e) Muestreo de los vehículos de prueba sin dispositivos de control de emisiones
  - f) Instalación de dispositivos de control de emisiones
  - g) Muestreo de los vehículos de prueba con los dispositivos de control
  - h) Archivo de datos y generación del informe final

Este proyecto ha generado una única y abundante base de datos de factores de emisión, emisiones totales, y de las condiciones de funcionamiento de los vehículos fuera de carretera a diésel en México. Esta base de datos permitirá evaluar los impactos de la implementación de tecnologías de control de emisiones disponibles para este tipo de vehículos en condiciones reales de operación. Así mismo, la base de datos será útil para la construcción de escenarios y medidas de mitigación.

## **Executive Summary**

Off-road diesel vehicles (e.g., forklifts, specialty vehicles, portable generators, and a wide array of other agricultural, construction, and industrial equipment) can be a major source of gaseous pollutants and submicron carbonaceous particles in many parts of the world. The introduction of new emission control technologies for off road diesel vehicles can be beneficial in the design of effective strategies in Mexico and developing countries for the mitigation of emissions of black carbon and other pollutants. Black carbon is a harmful pollutant to human health, and because of its important climatic effects is one of the main Short-Lived Climate Pollutants (SLCPs). As a result, the SLCPs have been included as a key component in the mitigation plans in the new “National Strategy for Climate Change in Mexico” program.

Recently, a variety of diesel vehicle exhaust treatment technologies designed to trap and eventually destroy a significant portion of diesel exhaust black carbon particles have become commercially available. Additional emissions control devices also target NO<sub>x</sub>, CO, VOCs and other gaseous pollutants. However, the gaseous and PM carbonaceous emissions produced by a diesel engine depend on many parameters that vary under local settings; thus testing the effectiveness of exhaust treatment technologies requires sampling a wide range of diesel vehicle operating parameters under real-world operating conditions.

This project carried out the characterization of the particulate matter (PM) and gaseous emissions with and without the implementation of control emissions technologies under real world operation conditions in the diesel-powered off-road mobile sector in Mexico. To obtain information on emissions (hydrocarbons, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM and black carbon) and the operating parameters of the selected off-road diesel vehicles, the Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) such as AVL Micro Soot Sensor, the SEMTECH ECOSTAR and the AXION systems were used. Measurements of the test vehicles were conducted under normal conditions of complete cycles of operation with and without emission control devices. The project took place in several stages, including:

- a) Planning and organization of measurements
- b) Selection and preparation of off-road vehicles for testing
- c) Acquisition of emission control devices
- d) Configuration and calibration of measurement equipment
- e) Sampling of test vehicles without emission control devices
- f) Installation of emission control devices and
- g) Sampling of test vehicles with control devices
- h) Data archiving and report generation

This project has produced a unique and extensive database of emission factors, total emissions data and operating conditions from off-road vehicles in Mexico. The results will help to evaluate the impacts on emissions reductions obtained from the implementation of readily available emission control technologies for diesel-powered vehicles in Mexico under real-world operations and to build scenarios and mitigation measures.

## **2. Introducción**

El uso de combustibles fósiles en fuentes móviles genera emisiones importantes de contaminantes gaseosos y de material particulado (PM). El PM está conformado por carbono negro (hollín), carbono orgánico y otros compuestos inorgánicos. El carbono negro está vinculado con efectos adversos a la salud humana, y es uno de los principales contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) debido a su efecto en el forzamiento radiativo y su vida más corta en la atmósfera en comparación con el dióxido de carbono. Por ello, recientemente la mitigación de los CCVC ha tomado un impulso con el objetivo de aminorar el cambio climático regional a corto plazo, así como para mejorar la calidad del aire y beneficiar la salud humana y los ecosistemas [UNEP/WMO, 2011; Shindell et al, 2012].

Se denominan vehículos fuera de carretera aquellas fuentes tales como generadores portátiles, montacargas, vehículos especiales y una amplia gama de otros equipos utilizados en la agricultura, la construcción y la industria, que no cuentan con permiso de vialidad para circular por las calles o carreteras debido a su peso, tamaño, diseño o baja velocidad. Una de las características de este tipo de equipos es que debido a sus requerimientos de potencia utilizan diésel como combustible y generalmente no cuentan con tecnología para el control de sus emisiones, por lo que pueden llegar a ser grandes emisores de gases contaminantes, carbono negro, materia orgánica y otros componentes del material particulado. Por tanto, el diseño de estrategias efectivas para la mitigación de emisiones de partículas y carbono negro en México debe incluir la introducción de nuevas tecnologías de control de emisiones para vehículos a diésel fuera de carretera.

Una evaluación mundial reciente indica que los vehículos fuera de carretera representan alrededor del 36% de las emisiones de carbono negro procedentes de fuentes móviles [Bond et al., 2013]. A nivel regional, la contribución de las emisiones de los vehículos fuera de carretera puede variar substancialmente en función del grado de desarrollo y las actividades económicas locales. Previo a este estudio, en México no existía información obtenida con mediciones locales sobre las características de las emisiones de los vehículos a diésel fuera de carretera. Las estimaciones más recientes en el Inventario Nacional de Emisiones (INEM) del 2008 indican que los vehículos a diésel fuera de carretera son responsables de alrededor del 15% de las emisiones de carbono negro, con una gran contribución de los equipos utilizados en actividades agrícolas y de construcción [SEMARNAT, 2013].

El Gobierno de México, a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), se ha comprometido a reducir las emisiones de CCVC y ha demostrado este compromiso a través de varios esfuerzos a nivel nacional e internacional. A diferencia de las fuentes móviles que circulan en carretera, en México existen menos esfuerzos para cuantificar los beneficios potenciales asociados a la reducción de las emisiones de fuentes móviles fuera de carretera. Por ello, los resultados de las acciones dirigidas a generar y mejorar las bases de datos relacionadas con vehículos fuera de carretera serán muy valiosos en la evaluación y en el desarrollo de inventarios de emisiones a nivel local y nacional.

Este documento presenta los resultados de la caracterización del material particulado (PM totales y carbono negro) y las emisiones gaseosas (hidrocarburos, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) generadas con y sin la aplicación de las tecnologías disponibles de control de emisiones en vehículos a diésel fuera de carretera en México utilizando Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS) tales como el AXION, el ECOSTAR y el AVL Micro-Soot Sensor. Las mediciones de los vehículos de prueba se realizaron en condiciones reales de ciclos de operación con y sin dispositivos de control de emisiones.

### **3. Objetivos**

El objetivo general de este proyecto fue el de caracterizar las emisiones de material particulado y gases de las fuentes móviles con motor a diésel fuera de carretera en México bajo condiciones de operación reales a partir de la medición de emisiones con equipos portátiles.

Objetivos específicos:

- Medir las emisiones de hidrocarburos, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM y el carbono negro de los vehículos seleccionados a diésel fuera de carretera, utilizados en actividades de la construcción y la agricultura en México, bajo condiciones reales de operación, utilizando Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS).
- Generar una base de datos de factores de emisión para los vehículos fuera de carretera, adecuados para evaluar los impactos de la implementación de trampas de partículas en México.

#### **4. Alcances y consideraciones**

La contribución de los vehículos fuera de carretera a las emisiones carbonáceas puede ser grande en comparación con el total de las emisiones de fuentes móviles. En el Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) 2008 se estima que los vehículos que circulan en carretera emiten aproximadamente la mitad de las emisiones de carbono negro de los vehículos a diésel fuera de carretera. La gran diferencia en las estimaciones se debe principalmente a la casi nula utilización de las tecnologías de control de emisiones en el parque vehicular fuera de carretera en México. Sin embargo, la evaluación de Bond et al., también indica que la incertidumbre asociada con las estimaciones de las emisiones de estas fuentes pueden ser aún mayores que para aquellas que circulan en carretera. Lo anterior es debido a que menos datos de actividad y de factores de emisión han sido recolectados localmente. La incertidumbre en las estimaciones también se debe a que las emisiones de partículas producidas por un motor a diésel dependen de muchos parámetros que varían bajo diversas condiciones de operación.

Actualmente existe un mercado muy variado de tecnologías de tratamiento diseñadas para atrapar y finalmente destruir una parte importante de las emisiones provenientes de los vehículos a diésel. Los sistemas de control de emisiones en vehículos fuera de carretera son cada vez más utilizados en Estados Unidos, Europa y Asia por el avance en las tecnologías vehiculares y en la calidad de sus combustibles.

En México y en otros países en vías de desarrollo, la introducción de nuevas tecnologías de control de emisiones de vehículos diésel fuera de carretera puede ser benéfica para el diseño de estrategias efectivas de mitigación de emisiones de carbono negro y otros contaminantes. Sin embargo, debido a que la tasa de emisión de partículas depende de diversos parámetros del motor y de las condiciones de operación de un vehículo a diésel, la eficiencia en el control de las emisiones puede variar en condiciones locales. Por lo tanto, es necesario probar la eficacia de las tecnologías para el tratamiento de las emisiones a través del muestreo de una amplia gama de parámetros de operación de los vehículos a diésel en condiciones reales de funcionamiento.

## **5. Metodología**

La metodología general para la realización del proyecto fue la siguiente:

- a) Planeación y organización del muestreo
- b) Selección y preparación de vehículos fuera de carretera para las pruebas
- c) Adquisición de los dispositivos de control de emisiones
- d) Configuración y calibración de los métodos de medición
- e) Muestreo de los vehículos de prueba sin dispositivos de control de emisiones
- f) Instalación de dispositivos de control de emisiones
- g) Muestreo de los vehículos de prueba con los dispositivos de control
- h) Archivo de datos y generación del informe final

Cada una de las etapas anteriores es descrita con detalle más adelante. En este proyecto se estimaron los factores de emisión y las emisiones totales de partículas y gases contaminantes con y sin dispositivos de control de emisiones para un número de vehículos seleccionados a diésel fuera de carretera en condiciones reales de operación en México.

Las pruebas se realizaron mediante la utilización de sistemas portátiles de medición de emisiones (PEMS) que fueron instalados en los vehículos seleccionados. Inicialmente, se midieron los factores de emisión de los vehículos de prueba sin utilizar dispositivos de control de emisiones en condiciones reales de operación. A esta etapa de mediciones se le denominó “línea base”. Posteriormente, se instalaron los dispositivos de control de emisiones en los vehículos de prueba seleccionados y se midieron sus factores de emisión replicando condiciones de operación similares a las adquiridas durante la fase anterior.

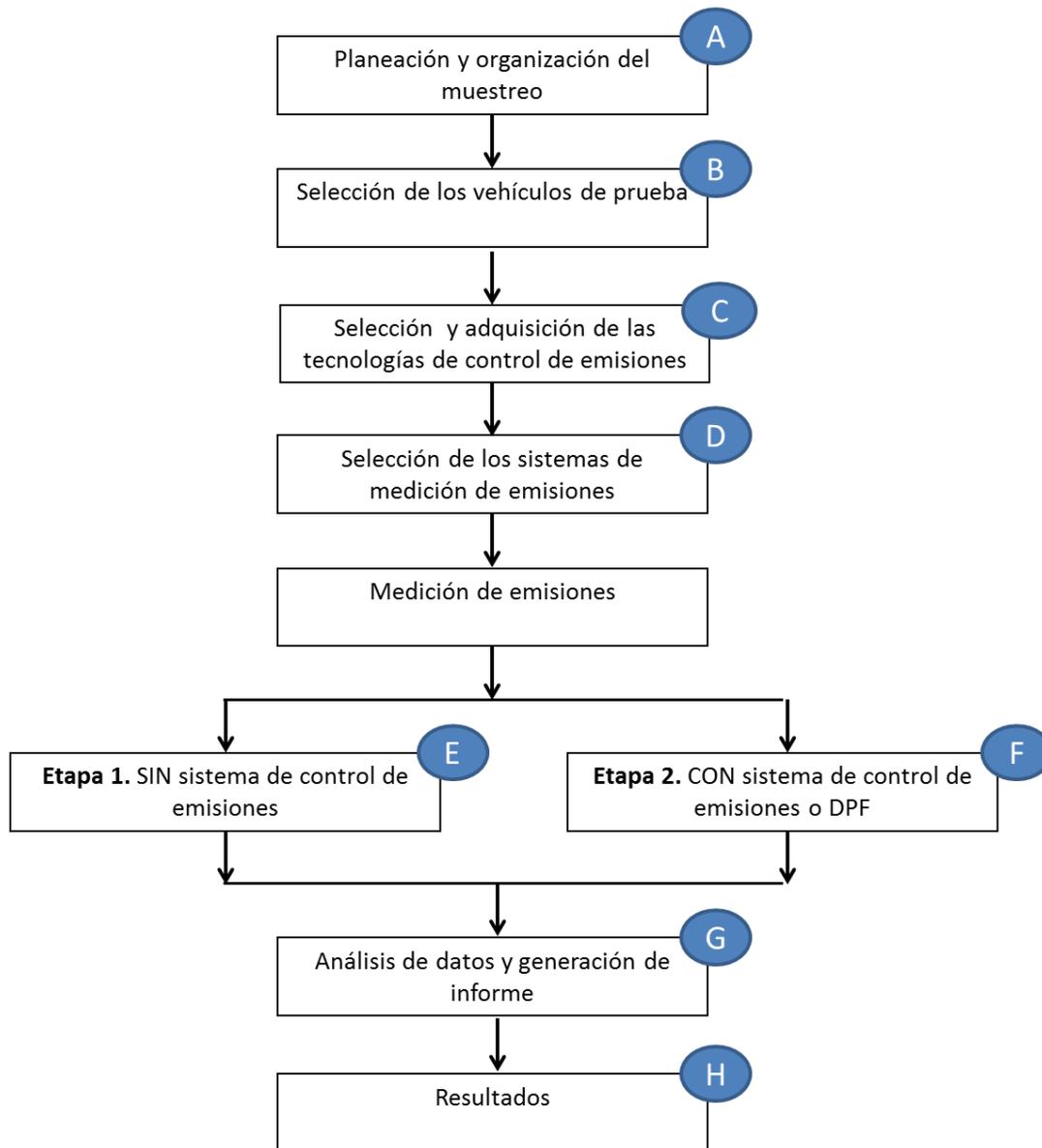
Como se describe más adelante, todas las mediciones de la línea base se realizaron en ciclos completos de operación. Sin embargo, en algunos vehículos, las mediciones con

la utilización de dispositivos de control fueron realizadas en ciclos reales de operación y en otros se realizaron en pruebas estacionarias.

Las mediciones se llevaron a cabo durante los ciclos de operación y estacionarias y los resultados se utilizaron para estimar las emisiones totales. Los beneficios de la reducción de las emisiones asociadas a cada tecnología se cuantificaron a través de la comparación de los factores de emisión medidos para cada uno de los pares de pruebas para cada uno de los vehículos. Para asegurar la robustez de los resultados se llevaron a cabo varias mediciones repetidas para cada vehículo sometido a prueba. De esta manera se cuantificaron los factores de emisión y las emisiones totales de partículas y gases contaminantes con y sin dispositivos de control para un número de vehículos seleccionados.

### **5.1. Procedimiento metodológico**

De acuerdo con lo establecido en el objetivo general y los objetivos específicos de este proyecto, para la realización del proyecto se llevaron a cabo los pasos sintetizados en la Figura 1, y sus características generales se explican a continuación:



**Figura 1.** Procedimiento metodológico

- a) *Planificación y organización de muestreo.* Esto incluye la planeación del estudio, considerando las tareas a realizar, los tiempos de ejecución y los responsables de las actividades. Abajo se muestran más detalles de esta etapa.
- b) *Selección y preparación de los vehículos fuera de carretera para las pruebas.* Este paso incluye la selección de los vehículos fuera de carretera, los cuales fueron utilizados para realizar las pruebas de emisiones. Se incluyeron equipos y

vehículos fuera de carretera utilizados en las actividades de la construcción y la agricultura. Abajo se muestran más detalles de esta etapa

- c) *Adquisición de tecnologías de control de emisiones.* Este paso incluye la obtención, bajo las características técnicas ideales, de los dispositivos de control de emisiones tales como filtros de partículas (DPF, siglas en inglés) y/o catalizadores de oxidación diésel (DOC, siglas en inglés) que fueron utilizados para realizar las pruebas de medición de emisiones de los vehículos a diésel seleccionados. Este paso incluyó también una inspección detallada de las características tecnológicas, de operación y mantenimiento de los vehículos fuera de carretera los cuales fueron candidatos a llevar instalado el dispositivo de control de emisiones. Entre los parámetros que se revisaron en los vehículos candidatos se encuentran: la potencia del motor, el volumen de desplazamiento, antigüedad, análisis de aceite e inspección visual del combustible. Debido a que el perfil de temperatura de los gases de salida de los vehículos de prueba es fundamental para la correcta selección de los dispositivos (pasivos o activos) de control de emisiones, se realizó un análisis detallado de este parámetro con la instalación de dispositivos de medición y almacenamiento de información (conocidos como dataloggers).
- d) *Configuración y calibración de los métodos de medición de emisiones.* Se utilizaron tres sistemas portátiles de medición de emisiones, que se describen posteriormente en este documento, con la finalidad de comparar los resultados y llegar a obtener factores de emisión consistentes. Para la realización de las pruebas se realizaron los procedimientos de calibración requeridos por el fabricante para cada uno de los instrumentos de medición utilizados.
- e) *Muestreo de vehículos sin dispositivos de control de emisiones.* Esto incluye la elaboración de un protocolo o procedimiento de pruebas para realizar las mediciones. Siguiendo el protocolo de muestreo, se midieron las emisiones de los vehículos fuera de carretera sin dispositivos de control de emisiones con la finalidad de tener la línea base de emisiones. Se aseguró una buena operación y mantenimiento de los vehículos de prueba.
- f) *Instalación de dispositivos de control de emisiones.* Se midieron las emisiones de los vehículos de prueba con dispositivos de control de emisiones con la finalidad de observar la eficiencia de este tipo de dispositivos en vehículos fuera de carretera. Los vehículos de prueba utilizaron el combustible requerido (diésel)

de ultra bajo azufre) para la utilización de los dispositivos de control seleccionados.

- g) *Muestreo de vehículos con dispositivos de control de emisiones.* Se realizaron las mediciones de los vehículos seleccionados utilizando el mismo protocolo de pruebas utilizado en las mediciones de línea base. Se midieron las emisiones de los vehículos fuera de carretera con dispositivos de control.
- h) *Archivo de datos y generación de informe.* Toda la información generada como parte de este proyecto de investigación, tanto en el trabajo de campo como de los análisis posteriores de la misma, se almacenó en formatos electrónicos. Con la información generada se elaboró este informe final de los análisis, resultados y conclusiones de la investigación.

## **5.2. Selección de los vehículos fuera de carretera para las pruebas.**

Una de las actividades primordiales de este proyecto fue la selección adecuada de los vehículos a utilizar durante las mediciones. En México no existe información detallada sobre el número, tipo y características de los vehículos fuera de carretera. Esta falta de información impide una selección representativa de las flotas de vehículos fuera de carretera que existen en el país. Sin embargo, dado su predominio como altos emisores de material particulado y gases, los vehículos seleccionados para realizar las mediciones incluyeron equipos grandes y medianos usados normalmente en actividades de construcción y agrícolas. Estos incluyen tractores, excavadoras, retroexcavadoras, martillo, compactadora, un generador eléctrico y cargadores frontales. También se incluyeron un compresor de aire y una grúa utilizada en las actividades de la construcción como equipos de prueba para la línea base.

Se realizaron visitas a diferentes instituciones y/o propietarios que utilizan vehículos fuera de carretera en México para inspeccionar las características técnicas de los equipos y determinar su probable participación en el proyecto. Un resumen de las visitas realizadas como parte de la selección de los vehículos de prueba se encuentra en el Anexo 1.

Como resultado de estas visitas de campo se obtuvo información técnica de más de 30 vehículos utilizados en actividades de la construcción y agrícolas. Con base en la información obtenida de los vehículos se emplearon tanto criterios técnicos como no-técnicos para seleccionar los vehículos que se utilizaron para las mediciones del proyecto. A continuación se describen los criterios utilizados:

## A. Criterios técnicos de vehículo

1. *Estado mecánico.* Se tomaron en cuenta las condiciones operativas y mecánicas de los vehículos que incluyen:
  - Sin vibraciones excesivas
  - Sin consumo excesivo de combustible
  - Sin consumo excesivo de aceite
  - Buena integridad del sistema de escape
  - Baja opacidad
  
2. *Especificaciones técnicas.* La potencia del motor, el modelo, la edad, y el volumen de desplazamiento del motor son las especificaciones técnicas críticas que se tomaron en cuenta para la selección de los vehículos de prueba.
  
3. *Factibilidad para la instalación de los instrumentos de medición.* Se tomó en cuenta la disponibilidad de espacio en los vehículos para, simultáneamente y de forma segura, instalar los equipos de medición. Dos criterios importantes fueron:
  - *Tamaño del vehículo.* Se requirió de una zona segura y que permitiera la maniobrabilidad del vehículo (por ejemplo, el techo sobre el operador o pasillos de acceso a la cabina) para sujetar con seguridad los instrumentos. Un vehículo grande está a menudo relacionado con una alta potencia del motor.
  - *Conexión a la línea de muestreo.* El diseño del sistema de escape debe de permitir la instalación de los puertos de muestreo de los instrumentos de medición. Como se describe más a delante, en algunos casos fue necesario diseñar, construir e instalar conexiones metálicas entre la línea de muestreo de los instrumentos de medición de emisiones y el escape de los vehículos.
  - *Puerto de muestreo.* Debido a que en el caso del PEMS AXION es necesario realizar un pequeño orificio a la entrada del motor para la instalación de un puerto de muestreo dedicado a la obtención de parámetros claves del funcionamiento de la máquina, se consideró la disponibilidad técnica para la realización del mismo y el acuerdo de los propietarios para la instalación del puerto.

4. *Integridad del sistema de escape del vehículo de prueba.* La integridad y el diseño del sistema de escape debía de permitir la instalación del dispositivo de control de emisiones.

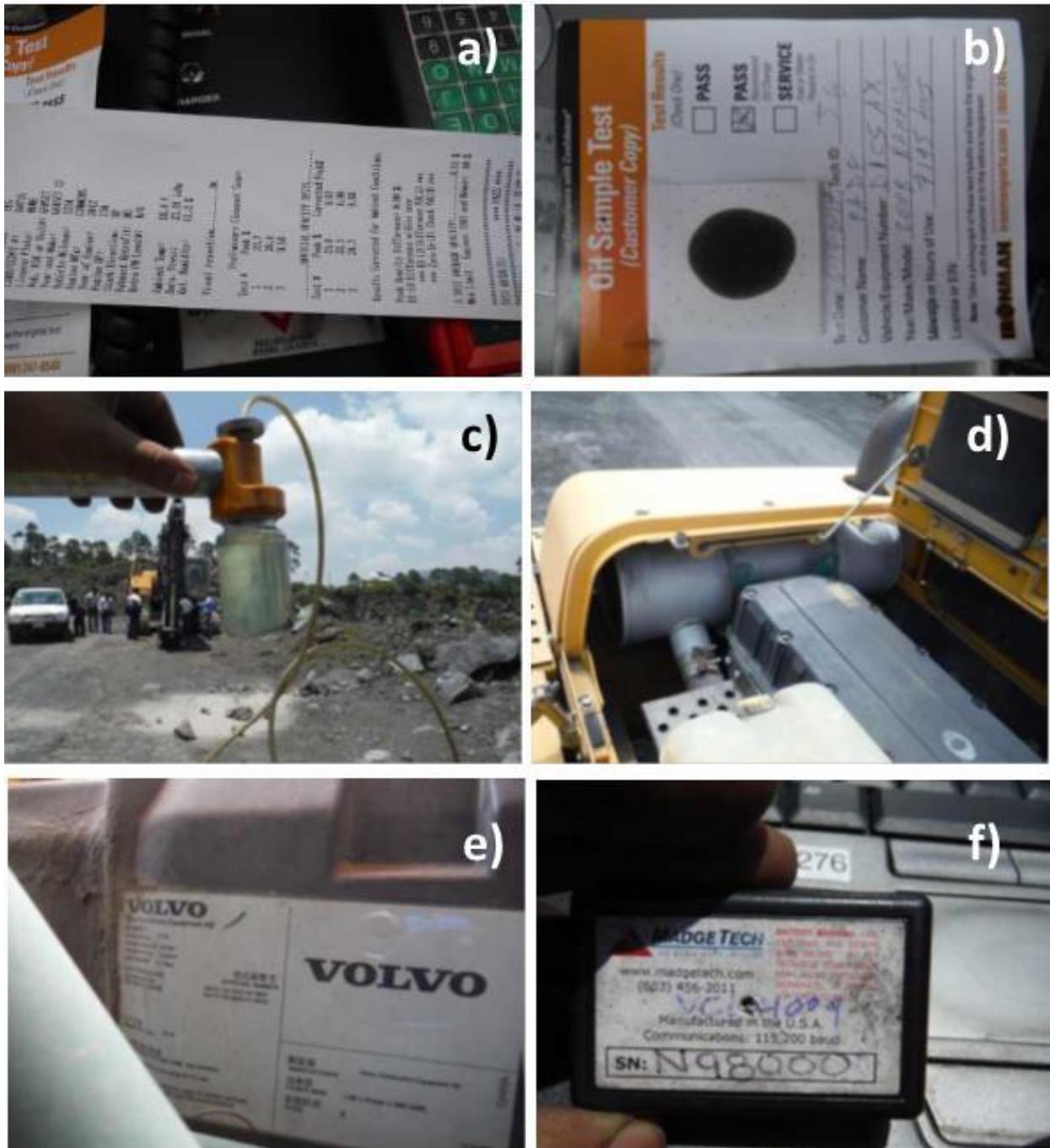
## **B. Criterios no-técnicos**

1. *Tipo de vehículo.* Se consideró que el tipo de vehículos seleccionados deben ser los que se utilizan comúnmente para las actividades de construcción y agrícolas en México.
2. *Ubicación conveniente.* Esto incluyó la identificación de las condiciones de seguridad para trabajar en la zona, el abastecimiento de combustible para los vehículos de prueba y la factibilidad para el transporte del personal y los materiales al sitio de muestreo.
3. *Disponibilidad de equipo.* La disponibilidad de los vehículos para ajustarse a los periodos de prueba fue un criterio muy importante de selección. Este criterio se aplicó debido a la complejidad en la logística del proyecto.
4. *Colaboración de los propietarios.* La participación del propietario y la disponibilidad de los operadores de los vehículos fue muy importante para la realización exitosa de este proyecto. Como proyecto de demostración, es muy importante tener un registro escrito de las operaciones del vehículo, de las condiciones mecánicas antes y después de la instalación del dispositivo de control de emisiones, y asegurar que los vehículos se mantengan en buenas condiciones mecánicas después de la instalación de los dispositivos de control.

## **C. Criterios para la instalación de un equipo de control de emisiones**

La instalación de los dispositivos de control de emisiones fue realizada por una compañía ubicada en California, USA, la cual tiene una amplia experiencia en la instalación de estos dispositivos. Como parte del proceso de selección, los vehículos preseleccionados fueron sometidos a pruebas adicionales por el instalador de los dispositivos de control de emisiones, incluyendo la medición de los siguientes parámetros: temperatura, presión, condiciones mecánicas, pruebas de combustible y de aceite, y los datos de actividad, por un número representativo de horas de operación por cada vehículo.

La medición de la temperatura de escape de emisiones se obtuvo por medio de la instalación de “data loggers” en los vehículos inspeccionados. Algunas de estas operaciones se muestran en la Figura 2. Las actividades realizadas por la compañía instaladora de los dispositivos de control de emisiones proporcionaron no solo la información necesaria para la selección de los tipos de dispositivo de control adecuados para cada vehículo, sino también contribuyeron como criterios de selección de los vehículos de prueba. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos con los dataloggers.



**Figura 2.** Ejemplos de la inspección técnica de los vehículos seleccionados, a) resultados de la prueba de opacidad, b) resultados de la prueba del aceite, c) resultados de la prueba de la gasolina, d) inspección del motor y el espacio disponible para la instalación del DPF, e) adquisición de la información técnica del vehículo. F) instalación del datalogger.

**Tabla 1. Resultados de la inspección técnica de los vehículos de prueba.**

	Vehículo de Prueba									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Propietario</b>	Planta de Asfalto Parres	Planta de Asfalto Iman	Planta de Asfalto Parres	Planta de Asfalto Iman	Planta de Asfalto Iman	Planta de Asfalto Parres	Planta de Asfalto Iman	Privado	GEO construction	GEO construction
<b>Tipo de Vehículo</b>	Pachara	Pachara	Escavador	Cargador	Cargador	Dozer D8T	Komatsu - Dozer	Tractor	Grua	Generador
<b>ID</b>	36-20	36-21	3112	WA600	WA600 - #2	Dozer	Dozer	TS6020	LS138 - 4339	Cummins
<b>VIN</b>	00115	ND	ND	KMTWA097A26060405	WA600 - #2	I-421000250-000007	KMT0D074C02080838	004TS60200021210080659	N9J7-9078	ND
<b>Marca</b>	Komatsu	Komatsu	Volvo	Komatsu	Komatsu	Caterpillar	Komatsu	New Holland	Linkbelt Hitachi	Cummins
<b>Modelo</b>	WB146	WB146	EC330B	WA600	WA600	D8T	D155AX-6	TS6020	138 HYLAB	ND
<b>Año Modelo</b>	2007	2007	2010	2007	2007	2010	2008	2008	ND	ND
<b>Marca del Motor</b>	Komatsu	Komatsu	Volvo	Komatsu	Komatsu	Caterpillar	Komatsu	New Holland	Mitsubishi	Cummins
<b>Modelo del Motor</b>	84D102	84D102	D12D	SAA6D170E-5	SAA6D170E-5	C15	SAA6D170E-5	TBD	ND	6BT5.9-G2
<b>Año del Motor</b>	2007	2007	2010	2007	2007	2010	2008	2008	ND	2001
<b>HP (ecu)</b>	96	96	328	531	531	535	360	105	ND	150
<b>ESN</b>	46940	ND	857401	510913	510975	LHX25932	535123	ND	6D16-A00050	87371816
<b>EFN</b>	7KLXL0275AAC	7KLXL0275AAC	ND	7KLXL23.2FD6	7KLXL23.2FD6	ACPXL15.2ESW	8KLX15.2ED6	ND	ND	1CEXL0359ADA
<b>Recomendado<sup>1</sup></b>	p.DPF	p.DPF	DCL - Mine-X	DCL - Mine-X	DCL - Mine-X	DCL - Mine-X	DCL - Mine-X	DCL - DOC only	DCL - Mine-X	ND
<b>Horas de Uso</b>	ND	ND	2951	ND	ND	1348	ND	ND	5664	1234
<b>Aceite</b>	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó
<b>Combustible</b>	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó	Pasó
<b>Opacidad</b>	14.10%	15.10%	3.48%	16.10%	15.60%	14.60%	10.80%	9%	11%	9.51%
<b>240C</b>	58.76%	27.80%	75%	61.59%	61.86%	74.60%	0%	ND	ND	ND
<b>260C</b>	54.22%	23.05%	71.39%	59.22%	56.71%	71.39%	0%	ND	ND	ND
<b>280C</b>	49.55%	17.89%	67.94%	56.95%	50.90%	67.94%	0%	ND	ND	ND
<b>300C</b>	45.30%	13.16%	64.44%	54.71%	43.34%	64.445	0%	ND	ND	ND
<b>DL pase<sup>1</sup></b>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	ND	N/A	ND	ND

<sup>1</sup>Para Verificar el Control de las emisiones del diesel (VDEC por sus siglas en Inglés).

## Vehículos seleccionados

Como resultado de las visitas de campo se obtuvo información técnica de más de 30 vehículos utilizados en actividades de la construcción y agrícolas. En el Anexo 2 se muestra una lista de todos los vehículos que se visitaron durante el proceso de selección para las pruebas. Con base en los criterios descritos anteriormente se seleccionaron un número menor de vehículos de prueba. La Tabla 2 muestra una lista con los vehículos fuera de carretera utilizados para el estudio de emisiones.

**Tabla 2.** Vehículos fuera de carretera utilizados para el estudio de emisiones.

Tipo de vehículo	Marca / Modelo	Año modelo	Foto	Propietario
Retroexcavadora	Komatsu -WB-146	2007		Gobierno del Distrito Federal / Av. Del Imán
Retroexcavadora	Komatsu - WB-146	2007		Gobierno del Distrito Federal / Parres
Bulldozer	Komatsu - 155-AX	2008		Gobierno del Distrito Federal / Av. Del Imán
Martillo	Volvo - EC3308-LC	2010		Gobierno del Distrito Federal / Parres
Cargador frontal	Komatsu - WA-600	2007		Gobierno del Distrito Federal / Parres
Bulldozer	Caterpillar - D8T	2010		Gobierno del Distrito Federal / Parres
Generador eléctrico	Cummings - 4B3,9-G1	2010		Gobierno del Distrito Federal / Parres
Cargador frontal	Komatsu - WA-600	2007		Gobierno del Distrito Federal / Av. Del Imán
Tractor agrícola	New Holland - TS-6020	2010		Asociación de Agricultores del Distrito Federal.
Grúa	Link Belt - LS-138H5	2009		GCGeoConstrucción

Los vehículos fuera de carretera seleccionados para la evaluación de sus emisiones son propiedad de diferentes instituciones, entre las que se encuentran la Planta de Asfalto del Gobierno del Distrito Federal (8 vehículos), localizados en Av. del Imán, Del. Coyoacán y en Parres (Km. 25 de la carretera libre México-Cuernavaca); de la empresa Geoconstrucción (un vehículo) y la Asociación de Agricultores del Distrito Federal (un vehículo) localizado en Topilejo, Del. Tlalpan.

Durante la preparación de las actividades del proyecto fuimos informados por la compañía propietaria que el generador eléctrico Cummins no estaría disponible para las mediciones de línea base. Afortunadamente, se pudo contar con otros dos equipos a diésel fuera de carretera propiedad de la Planta de Asfalto del Distrito Federal ubicada en Parres para reemplazar en las pruebas el generador eléctrico de la compañía constructora. Los dos equipos adicionales que se incluyeron en las mediciones de línea base fueron:

1. Generador Eléctrico Cummins: modelo de motor: 3b3.9 – G1 con 37 HP.
2. Compresor de aire usado en taladros neumáticos de alta potencia.

Así mismo, previo al inicio de la campaña de medición, el equipo del proyecto realizó una visita final a los directivos de la planta de asfalto para sostener una reunión de planeación para acordar los pasos siguientes del estudio de emisiones para vehículos fuera de carretera.

- Propuesta de calendario de medición de campaña de medición de emisiones.
- Protocolo de medición (ver Anexo 3).
- Mantenimiento de los vehículos.
- Fechas de medición

El resumen de la reunión y los acuerdos se incluyen en el Anexo 4.

### **5.3. Plataformas portátiles de medición de emisiones**

Las siguientes plataformas portátiles de medición de emisiones se utilizaron en este proyecto para obtener los datos pertinentes para estimar los factores de emisión de los vehículos de prueba:

1. Un sistema **AVL Micro-Soot-Sensor**(<https://www.avl.com/micro-soot-sensor>) portátil el cual cumple con los requerimientos de certificación de la EPA CERT 1065 para medir las emisiones de carbono negro de vehículos en uso. Este sistema AVL mide el carbono negro con una resolución temporal de un segundo de las emisiones de los vehículos sometidos a prueba fuera de carretera utilizando un sensor foto-acústico de micro-hollín y un módulo de filtro gravimétrico. Esto permitió la cuantificación de la eficiencia de la eliminación de hollín por los dispositivos de control de emisiones para los vehículos fuera de carretera seleccionados. El sistema AVL-MSS tiene un protocolo de calibración de flujos y señales de datos (no es necesario para el hollín pues el principio de funcionamiento no está basado en la opacidad de la muestra) establecido por el fabricante. Se realizaron las calibraciones correspondientes recomendadas por el fabricante al inicio de cada periodo de mediciones para cada vehículo de prueba.
2. Un sistema **SEMTECH ECOSTAR**(<http://www.sensors-inc.com/ecostar.html>) el cual es un instrumento modular que cumple con los requerimientos de certificación de la EPA CERT 1065. El monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se miden a través de sistemas infrarrojos no dispersivos (NDIR), mientras que el monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno se miden con un sistema no dispersivo de luz ultravioleta (NDUV). Este instrumento utiliza un sistema medidor de flujos para determinar la masa de los contaminantes emitidos. La calibración de este equipo requirió de gases traza de gran calidad y en concentraciones adecuadas. Se realizó la calibración del equipo de medición antes de su utilización para cada prueba.
3. Un sistema **AXION** (<http://globalmrv.com/products/axionrs-2/>) que es un sistema portátil de monitoreo que ofrece una capacidad de pruebas portátiles de emisiones para la evaluación de vehículos en carretera, fuera de carretera, y vehículos o equipos estacionarios, para medir hidrocarburos (HC), CO y CO<sub>2</sub> a través de sistemas NDIR, mientras que el NO<sub>x</sub> se mide como NO mediante una celda electromagnética. El material particulado se mide utilizando una técnica de dispersión de luz láser. Todos los contaminantes se midieron de forma continua, sobre una base de segundo a segundo. Además de las concentraciones de contaminantes, los sistemas de medición obtienen la velocidad del vehículo, las rpm del motor, torque, presión, flujo de escape, la relación de aire-combustible, consumo de combustible y las tasas de flujo de masa. Por lo tanto, el tiempo total, distancia, consumo de combustible y las emisiones se calculan para cada segmento de prueba definido. Este sistema tiene un protocolo de calibración

establecido directamente por el fabricante y que está incluido en la interface con el usuario del equipo. Debido a la estabilidad de sus señales de salida para este equipo frecuentemente no es necesario realizar una calibración antes de cada prueba. Sin embargo, se realizaron calibraciones siguiendo las recomendaciones del fabricante.

#### **5.4. Planeación y organización del muestreo**

La planeación y organización de las actividades de muestreo fue realizada por los participantes del proyecto e incluyeron: reuniones, visitas de campo, entrenamiento de personal para la operación de los instrumentos de medición, realización de pruebas en condiciones controladas, planeación de calendarios de muestreo, y la fabricación y adquisición de dispositivos adicionales necesarios para la realización de las mediciones en condiciones de seguridad. Estos pasos son descritos a continuación:

##### **Participantes**

El proyecto fue dirigido por el LTMCE2 Center y sus colaboradores del Centro que realizaron las mediciones con el AVL-MSS y dirigieron las actividades de análisis de datos. Integrantes adicionales y colaboradores del proyecto incluyeron:

- El Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) que participaron en las mediciones utilizando el equipo AXION para algunos de los vehículos seleccionados y en el análisis de los datos obtenidos.
- El Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA) del Instituto Tecnológico de Monterrey (ITESM) campus Toluca el cual participó en las mediciones utilizando el equipo SEMTECH ECOSTAR y en el análisis de los datos obtenidos.
- El California Air Resources Board (CARB) el cual ha colaborado con el préstamo del equipo de mediciones Micro-Soot Sensor y con apoyo técnico.

Adicionalmente, se contó con apoyo técnico y logístico de personal altamente capacitado del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

## **Reuniones del Proyecto**

Los participantes mencionados del Equipo del Proyecto se reunieron (en forma personal o a través de internet) numerosas ocasiones para discutir y planear las actividades a realizar, incluyendo:

El desarrollo del calendario de actividades, visitas a sitios potenciales para realización de las mediciones para la caracterización de las emisiones, y la recopilación de información técnica necesaria para la adquisición e instalación de los dispositivos de control de emisiones.

- Establecer condiciones de seguridad durante el muestreo.
- Adquisición de equipos de seguridad personal para los participantes del proyecto.
- Diseño de un protocolo de muestreo (ver Anexo 3).

## **Visitas de campo**

Como se mencionó en la Sección 5.2, los participantes del Equipo del Proyecto realizaron visitas a algunas instituciones gubernamentales y privadas para pre-seleccionar los vehículos de prueba. Adicionalmente, una vez que los vehículos de prueba fueron seleccionados, se realizaron visitas adicionales con los participantes propietarios de los vehículos. Así, durante la planeación y organización de este Proyecto, se realizaron reuniones y visitas de campo para:

- Confirmar la su participación en la elaboración del proyecto.
- Selección de los vehículos a utilizar para las pruebas
- Obtención de datos técnicos de los motores y parámetros físicos

## **Entrenamiento del personal**

Se realizaron entrenamientos a estudiantes del TEC de Monterrey (Campus Toluca) y de la UNAM-CCA, así como a otros participantes del proyecto para la operación y calibración de los equipos de medición. Se aseguró que los participantes del proyecto entendieran y siguieran el protocolo de mediciones desarrollado.

## **Realización de pruebas en laboratorio con los equipos de mediciones**

Los participantes del proyecto realizaron pruebas de operación de los equipos de muestreo en laboratorio (es decir, los equipos de medición no se sometieron a movimiento) utilizando un vehículo de prueba en forma estacionaria. Esto permitió anticipar requerimientos de tiempos de ejecución, consumibles, y aditamentos durante las pruebas reales. Adicionalmente, estas pruebas permitieron mejorar aún más el protocolo de mediciones.

## **Instalación de los instrumentos de medición**

La seguridad de los operadores de los vehículos y de los equipos de medición, así como la integridad de los mismos, es prioridad en cualquier prueba de medición en campo. Por ello se requirió de la elaboración de estructuras metálicas de soporte para el montaje de los instrumentos en los vehículos de prueba. La base de las estructuras metálicas contenía también a las placas amortiguadoras diseñadas y adquiridas específicamente para los instrumentos AVL-MSS y ECOSTAR por el fabricante de los mismos. Debido a su tamaño y maniobrabilidad el instrumento AXION fue montado sobre la estructura metálica que contenía al ECOSTAR, mientras que la otra estructura metálica contenía al instrumento AVL-MSS y la toma de muestra principal a la cual se conectaban los tres equipos.

Debido al constante y agresivo movimiento y vibración de los vehículos, el montaje de los instrumentos de medición en la estructura metálica se realizó utilizando una abundante cantidad de material amortiguador de las vibraciones entre las paredes de contacto de los instrumentos y la estructura metálica. El material utilizado para disipar las vibraciones fue reemplazado frecuentemente debido a que su rendimiento y amortiguamiento disminuye con el estrés mecánico, las altas temperaturas y la vibración excesiva.

La estructura metálica que contenía cada instrumento fue colocada en regiones que no provocaran interferencias en la operación de los vehículos o en la visibilidad de sus conductores. Una vez seleccionados los sitios de ubicación de cada instrumento, el montaje se realizó utilizando numerosos bandas sujetadoras entre las estructuras metálicas que los contenían y puntos dentro del vehículo lo suficientemente fuertes para sujetarlos de manera que los instrumentos quedaran excepcionalmente fijos al movimiento de los vehículos. Los equipos adicionales (e.g. generador eléctrico, fuente

de aire cero) fueron montados también utilizando bandas sujetadoras en sitios estratégicos.

Finalmente, una vez montados los instrumentos de medición sobre el vehículo de prueba, se procedía a la instalación de las conexiones tubulares metálicas necesarias entre el escape del vehículo y la toma de muestra principal de los instrumentos. Posteriormente, la realización de las pruebas se hizo siguiendo el protocolo descrito en el Anexo 3 y que incluye la calibración de los instrumentos de medición antes y después de las pruebas. El procedimiento de instalación de instrumentos y de conexión a la línea principal de muestreo fue el mismo para cada vehículo antes y después de la instalación del dispositivo de control de emisiones.

En la medida de lo posible, las mediciones se realizaron de forma paralela con los equipos AVL-MSS y el ECOSTAR en cada una de las pruebas. Esto permitió obtener información continua de los gases contaminantes y partículas emitidas para cada vehículo seleccionado. Adicionalmente, el sistema PEMS AXION se usó paralelamente a los otros dos equipos de mediciones. Cabe mencionar que a diferencia del sistema ECOSTAR en el cual el flujo de emisiones es directamente medido con un flujo-metro, en el sistema AXION el flujo de emisiones es estimado a partir de los parámetros de la maquina medidos por el equipo.

En la Figura 3 se presenta una descripción fotográfica de algunas de las etapas llevadas a cabo para completar las mediciones exitosamente.

### **Tiempos de ejecución**

Siendo que una parte importante de las pruebas se llevaron a cabo durante la temporada de lluvias en México, se requirió de la constante protección de los equipos contra la lluvia y de continuas modificaciones al calendario de pruebas. Debido a que los vehículos fuera de carretera trabajan a la intemperie, una de las reglas de operación es que no pueden laborar bajo lluvia o actividad eléctrica (en particular, en la localidad de Parres este último fenómeno es muy frecuente en época de lluvia, debido a que se localiza en una zona boscosa), ya que la lluvia impide una buena visibilidad del operador del vehículo, lo que sumado a la actividad eléctrica ponen en riesgo la integridad física del conductor y del vehículo. Afortunadamente ningún equipo se dañó como resultado de las vibraciones o de la extensa lluvia. El calendario de ejecución del proyecto se muestra a continuación en la Figura 4.



Preparaciones en el laboratorio



Preparando instrumentos en campo



Calibraciones antes de las pruebas



Preparación de la línea de muestreo

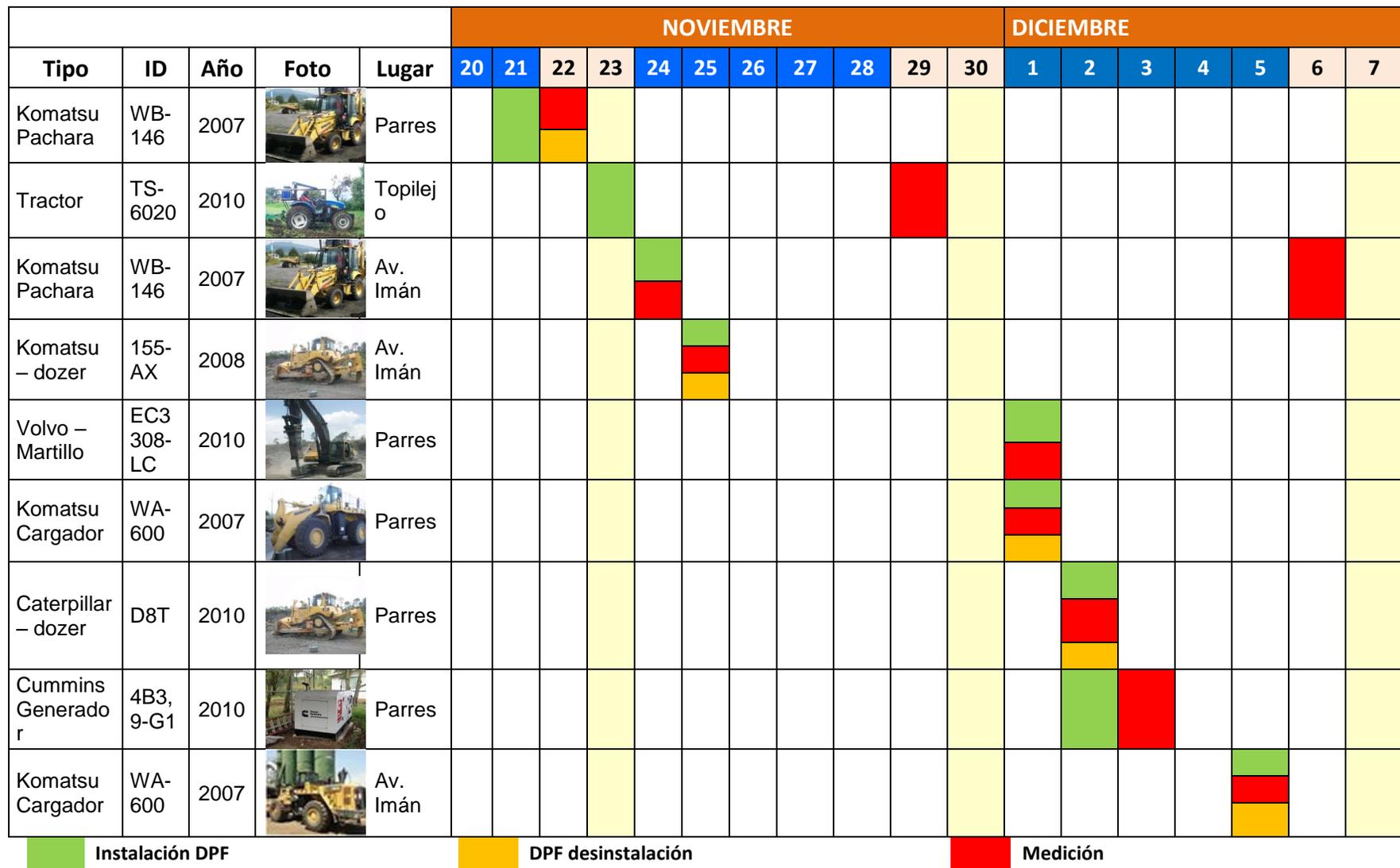


Montaje de instrumentos



Instalación de instrumentos

**Figure 3.** Descripción grafica de algunos de los pasos que se llevaron a cabo para realizar las mediciones en los vehículos de prueba.



**Figura 4.** Calendario de actividades del proyecto.

## **6. Resultados**

Los instrumentos AVL-MSS y SEMTECH-ECOSTAR fueron utilizados para medir todos los vehículos. El AXION se utilizó solo en algunos de los vehículos pero siempre junto a los equipos AVL-MSS y SEMTECH-ECOSTAR (Tabla 3). Los vehículos a diésel seleccionados (retro-excavadoras, tractor, martillo, cargadores frontales, dozers, grúa, compresor, generador eléctrico) representan una importante variedad de vehículos de trabajo mediano y pesado fuera de carretera que se utilizan en México. La instalación conjunta y medición paralela de los equipos AXION y SEMTECH ECOSTAR durante las mediciones permite la inter-comparación de las mediciones de compuestos gaseosos emitidos por los vehículos. Así mismo, la instalación conjunta y localización de los instrumentos AVL-MSS y AXION permite obtener información de la cantidad de carbono negro contenido en las emisiones del material particulado de mayor tamaño provenientes de los vehículos medidos.

La medición de las emisiones de los vehículos seleccionados requirió de un gran número de actividades de preparación. Debido a que cada tipo de vehículo fuera de carretera tiene una forma distinta y una escape de gases diferente, para cada vehículo se requirió de un plan de acción distinto previo a la instalación de los instrumentos de medición, el generador portátil, el generador de aire cero y todos los accesorios necesarios para las mediciones. Así mismo, para cada tipo de vehículo se presentó el reto de diseñar una línea de muestro diferente que conectara el escape con los instrumentos de medición. En la Figura 5 se presenta una descripción fotográfica de los pasos que se llevaron a cabo para conectar el escape de cada tipo de vehículo a los instrumentos de muestreo. Cabe destacar que el espacio disponible para la instalación de los instrumentos en la mayoría de los vehículos era muy limitado y, al mismo tiempo, requerían de estar muy bien afianzados y asegurados.

Debido a que la seguridad de los operadores de los vehículos y de los equipos de medición, así como la integridad de los mismos, es prioridad en cualquier prueba de medición en campo, se requirió de la elaboración de una estructura metálica de soporte para el montaje de los instrumentos en los vehículos de prueba. Se utilizó una estructura metálica para soportar el instrumento AVL-MSS y otra para soportar al mismo tiempo al AXION y al SEMTECH-ECOSTAR. Así mismo, debido al constante y agresivo movimiento y vibración de los vehículos, los bordes de las estructuras metálicas se rellenaron con una abundante cantidad de material plástico amortiguador de las vibraciones. El material para disipar las vibraciones fue reemplazado

frecuentemente entre las mediciones debido a que su rendimiento disminuyó con las altas temperaturas y la vibración excesiva.

La estructura metálica fue colocada en regiones que no provocaran interferencias en la operación de los vehículos o en la visibilidad de sus conductores. Todos los participantes utilizaron equipo de seguridad durante las mediciones. Así mismo, siendo que las pruebas se llevaron a cabo durante la temporada de lluvias en México, se requirió de la constante protección de los equipos contra la lluvia. Ningún equipo se dañó como resultado de las vibraciones o de la extensa lluvia.

El protocolo de medición se diseñó con la colaboración de todos los participantes durante la fase de preparación de las mediciones. El protocolo se diseñó con la suficiente flexibilidad para poder ser renovado cuanto fuera necesario para adaptarse a las condiciones existentes como estas fueran cambiando para cada vehículo de prueba. El protocolo de medición incluye los pasos necesarios para la instalación de los PEMS y los accesorios necesarios así como los procedimientos de operación a seguir durante las mediciones. Cabe destacar como parte principal del protocolo de mediciones, como se mencionó anteriormente, que las condiciones de seguridad de los participantes siempre fueron prioritarias.

Siguiendo el protocolo, se registraron todas las operaciones durante las mediciones en una hoja de registro que incluye, entre otras cosas, información técnica del vehículo y de las condiciones de operación bajo las cuales se realizaron las pruebas. Un ejemplo de la hoja de registro se presenta en el Anexo 5. Previo la medición de los vehículos de prueba se discutieron todas las actividades que el vehículo debía de realizar con los operadores y se les pidió que, en la medida de lo posible, no se desviaran de esas actividades. Sin embargo, de manera de utilizar operaciones reales de trabajo, las actividades a seguir fueron siempre sugeridas por los operadores de los vehículos como las actividades típicas llevadas a cabo en un día de trabajo. Las actividades, dependiendo del vehículo, generalmente incluían: dragado, acarreado, levantamiento, movimiento de un lugar a otro, y martillado. Como se muestra en el Anexo 5, las actividades fueron registradas con el suficiente detalle para permitir el análisis temporal de las observaciones tomadas. Así, la información obtenida fue esencial para la estimación de los factores de emisión por tipo de actividad.

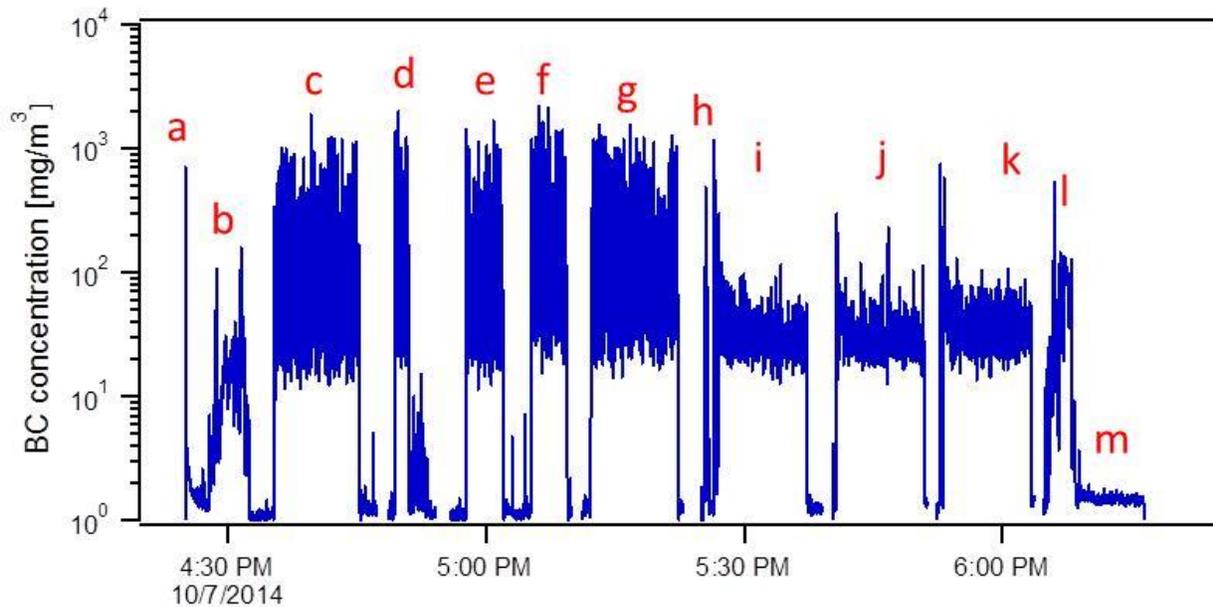
Los periodos de medición de cada vehículo fueron de aproximadamente 10 minutos para cada actividad de trabajo y se repitieron al menos dos o tres veces para cada vehículo. También como parte del protocolo de mediciones, entre cada prueba los vehículos se detuvieron (se mantuvieron en ralentí) y se confirmó la adquisición de datos y la integridad de los equipos de medición; Así mismo, durante estos periodos se revisaron las conexiones y las condiciones de seguridad de los instrumentos. Así, cualquier error que se haya presentado en las condiciones de seguridad y la adquisición de datos se corrigió antes de comenzar el nuevo periodo de muestreo.



**Figura 5.** Descripción fotográfica de las actividades que se desarrollaron durante las mediciones de las emisiones de los vehículos de prueba.

Debido a la alta frecuencia de medición de los instrumentos utilizados y al número de parámetros que se midieron durante las pruebas, se recolectaron abundantes bases de datos sobre las emisiones y sus características de los vehículos de prueba. Los datos son ricos en información sobre los parámetros de operación de cada uno de los vehículos. En la Figura 5 se presenta un ejemplo de las concentraciones de carbono negro obtenidas durante las mediciones de una retroexcavadora. En la figura se pueden observar distintas etapas durante la operación de los vehículos. Las etapas de la operación se describen en la lista siguiente (las cuales se indican con letras rojas sobre la figura).

- a. Un pico de alta concentración debido a la ignición del vehículo (no se refiere a emisiones de un vehículo frío). Los vehículos se calentaron por unos minutos antes de comenzarse a medir.
- b. El vehículo se movió del área de instalación de los instrumentos hacia el área de prueba
- c. La primera prueba se llevó a cabo usando la cubeta frontal para mover un montículo de tierra como material de prueba.
- d. La segunda prueba con la cubeta frontal se inicia pero se detiene por varios minutos para verificar la seguridad de los cinturones de seguridad de los instrumentos.
- e. La siguiente prueba continúa pero requiere de una revisión de seguridad.
- f. Finaliza la segunda prueba con la cubeta frontal
- g. Se completó la tercera etapa de prueba con la cubeta frontal
- h. La retroexcavadora se posiciona para la primera prueba con la cubeta trasera.
- i. Se termina la primera prueba con la cubeta trasera
- j. Se termina la segunda prueba con la cubeta trasera
- k. Se termina la tercera prueba con la cubeta trasera
- l. La retroexcavadora se mueve de regreso al área de instalación de los instrumentos
- m. La retroexcavadora se encuentra en ralentí



**Figura 6.** Concentraciones de carbono negro obtenidas durante la operación de prueba de la retroexcavadora Komatsu WB146 en la planta de asfalto de Avenida del Imán.

**Calculo de factores de emisión.**

El cálculo de los factores de emisión se realizó siguiendo la siguiente ecuación:

$$EF_j = \sum_i^n c_i f_i \rho_i^{-1} 1000$$

En donde  $EF_j$  es el factor de emisión en mg/s del contaminante  $j$ ,  $c_i$  es la concentración promedio del contaminante  $j$  en el periodo  $i$ ,  $f_i$  es el flujo másico promedio en kg/s medido en el periodo  $i$ , y  $\rho_i$  es la densidad promedio en kg/m³ del flujo de escape en el mismo periodo. El valor de 1000 representa el factor de conversión de gramos a miligramos. Cuando aplica, el cálculo del factor de emisión global se obtiene al realizar la sumatoria de los  $n$  periodos de medición en condiciones de operación del vehículo.

Utilizando la ecuación anteriormente descrita se analizaron los datos obtenidos para cada uno de los vehículos de prueba. En el análisis, los periodos de operación  $i$  son

definidos para cada uno de los vehículos de acuerdo a las tareas o trabajos típicos que son realizados por el equipo y que representan diferentes condiciones de potencia para el motor del vehículo. Por ejemplo, durante las mediciones el vehículo de prueba puede estar sometido a operaciones como levantamiento, empuje, arrastre, etc.

El análisis de los datos obtenidos en campo incluye entonces una selección de los periodos de operación de los vehículos de prueba. Este procedimiento se realizó directamente de las series de tiempo en forma similar como se describió en la Figura 6. En el Anexo 6 se muestran gráficamente el resto de los datos obtenidos para cada vehículo de prueba.

En las secciones siguientes presentamos un resumen de los resultados obtenidos aplicando el análisis descrito. Cabe mencionar que aunque es el mismo procedimiento de análisis el que se aplica para los datos obtenidos de las mediciones antes y después de la instalación de los filtros, la inter-comparación de los factores de emisión correspondientes solo tiene sentido al considerar los mismos periodos de operación (es decir, periodos *i* equivalentes) tales como se muestra en la Figura 6.

### **6.1 Muestreo de vehículos a diésel fuera de carretera sin dispositivos de control: creación de la línea base**

La lista de los vehículos cuyas emisiones fueron muestreadas para la línea base se encuentra en la Tabla 3. Como se describió anteriormente, se realizaron pruebas repetidamente en algunos de los vehículos cuando la información recopilada en la primera prueba no fue suficiente para caracterizar las emisiones del vehículo por alguno de los instrumentos de medición. En la Tabla 3, cada prueba tiene un número de identificación que se refiere a una medición realizada para la línea base (la S en la identificación de cada prueba en la Tabla 3 se refiere a una medición *sin* dispositivo de control, es decir línea base).

**Tabla 3.** Vehículos medidos para la generación de la línea base.

No Prueba	Prueba ID	Marca	Tipo de Vehículo	ID de Vehículo	Sitio	PEMS
1	1a	Komatsu	Excavadora	WB-146 Imán	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION
2	2	Volvo	Martillo	EC3308-LC	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR
3	3a	Komatsu	Cargador Frontal	WA-600 at Iman	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION
4	4	Komatsu	Dozer	155-AX	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION
5	5	Komatsu	Retro-excavadora	WB-146 Parres	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR AXION
6	6a	New Holland	Tractor	TS- 6020	Topilejo	AVL-MSS ECOSTAR
7	7	Caterpillar	Dozer	D8T	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR
8	1b	Komatsu	Retro-excavadora	WB-146 Imán	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION
9	3b	Komatsu	Cargador Frontal	WA-600 at Imán	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION
10	8	Link-Belt	Grúa	LS-138H5	Sitio de Geo-Construction	AVL-MSS ECOSTAR
11	6b	New Holland	Tractor	TS- 6020	Topilejo	AVL-MSS ECOSTAR
12	9	Cummins	Compresor	LT10	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR
13	10	Cummins	Generador Eléctrico	4B3,9-G1	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR
14	11	Komatsu	Cargador Frontal	WA-600 at Imán	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR AXION

Los factores de emisión obtenidos por las mediciones sin la instalación de dispositivos de control de emisiones en los vehículos fuera de carretera seleccionados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Factores de emisión [mg/s] (25 y 75 percentiles) obtenidos para los vehículos de prueba sin la instalación de dispositivos de control (línea base).

ID	Tipo de vehículo	Vehículo ID	Operación	CO <sub>2</sub> mg/s	CO mg/s	NO <sub>x</sub> mg/s	BC mg/s
S_1	Retroexcavadora	WB-146 Imán	Ralentí	(1,421.8, 1,524.4)	(2.2, 3.4)	(44.0, 47.8)	(31.0, 36.3)
			Trabajo cubeta	(7,243.1, 8,949.0)	(16.7, 46.2)	(73.4, 92.5)	(2,653.6, 11,855.0)
			Trabajo pala	(6,683.4, 7,669.2)	(6.3, 10.8)	(71.1, 77.6)	(1,604.9, 2,466.0)
S_2	Martillo	EC330 8-LC	Ralentí	(4,938.1, 4,986.1)	ND	(48.2, 50.0)	(62.4, 76.2)
			Martillando	(16,004.7, 16,613.2)	ND	(160.8, 166.6)	(3,776.5, 4,514.7)
S_3	Cargador frontal	WA-600 Imán	Ralentí	(24,660.8, 26,810.1)	(29.3, 85.0)	(215.4, 225.9)	(5,780.3, 7,133.7)
			Cargando	(46,854.4, 65,757.7)	(1,267.9, 8,720.5)	(186.5, 300.1)	(7,653.2, 107,020.0)
S_4	Dozer	155-AX	Ralentí	(2,191.8, 2,293.9)	(5.4, 8.2)	(32.0, 32.9)	(1,894.0, 2,118.8)
			Empujando	(10,904.0, 27,091.6)	(26.8, 108.1)	(76.9, 145.0)	(5,162.0, 18,063.3)
S_5	Retroexcavadora	WB-146 Parres	Ralentí	(1,689.5, 1,739.8)	(3.8, 6.9)	(46.6, 48.7)	(23.5, 27.2)
			Trabajo cubeta	(3,469.8, 5,746.8)	(6.3, 13.3)	(73.1, 95.4)	(294.2, 2,995.2)
			Trabajo pala	(4,425.0, 5,760.4)	(6.5, 9.1)	(75.7, 93.7)	(598.9, 2,819.3)
S_6	Tractor	TS-6020	Ralentí	(1,068.2, 1,244.6)	(10.3, 28.7)	(12.0, 13.4)	(12.5, 14.8)
			Arando cuesta arriba	(5,763.6, 7,338.9)	(10.5, 61.1)	(51.7, 55.5)	(455.9, 870.2)
			Arando cuesta abajo	(2,282.1, 3,265.2)	(12.1, 36.9)	(24.5, 33.6)	(67.6, 135.3)

S_7	Dozer	D8T	Ralentí	(2,381.4, 2,689.2)	(5.1, 5.6)	(128.6, 136.4)	(72.8, 89.0)
			Empujando	(17,562.2, 26,017.4)	(27.2, 49.1)	(418.5, 557.3)	(11,807.2, 23,163.1)
			Retrocediendo	(7,965.6, 13,980.4)	(6.1, 23.4)	(265.3, 334.2)	(2,078.9, 6,515.1)
S_8	Grúa	LS- 138H5	Ralentí	ND	ND	(17.9, 18.3)	(77.4, 88.0)
			Jalando	ND	ND	(46.9, 55.9)	(795.8, 10,042.5)
S_9	Compresor	LT10	Trabajando	(5,634.7, 5,821.7)	(17.5, 19.4)	(43.5, 46.1)	(1,437.2, 1,670.9)
S_10	Generador eléctrico	4B3,9- G1	Trabajando	(2,021.9, 2,075.3)	(34.5, 35.5)	(35.3, 36.5)	(23.4, 26.8)
S_11	Cargador Frontal	WA- 600 Parres	Ralentí	(25,334.5, 30,417.1)	(25.4, 65.3)	(217.7, 247.4)	(5,376.3, 7,317.4)
			Trabajando	(46,243.2, 55,595.9)	(219.8, 1,226.0)	(205.7, 269.1)	(12,011.5, 94,630.2)

## 6.2 Muestreo de vehículos a diésel fuera de carretera con dispositivos de control

La lista de los vehículos cuyas emisiones fueron muestreadas después de la instalación de los dispositivos de control se encuentra en la Tabla 5. En este caso solo se realizó una segunda prueba para la retroexcavadora localizada en la planta de asfalto en Imán, pues en todos los demás vehículos los datos obtenidos cumplieron en la primera prueba los objetivos de muestreo. Al igual que en las mediciones de línea base, en la Tabla 5 cada prueba tiene un número de identificación que se refiere a una medición realizada con dispositivo de control instalado (la letra C en la identificación de cada prueba en la Tabla 5 se refiere a una medición *con* dispositivo de control siguiendo el identificador de las pruebas de línea base descrito en la Tabla 3). De esta manera es posible comparar con el mismo identificador los resultados para cada vehículo de prueba con y sin dispositivo de control.

**Tabla 5.** Lista de vehículos de prueba utilizados para la medición de emisiones con dispositivos de control instalados.

Prueba	Prueba ID	Marca	Tipo de vehículo	Vehículo ID	Lugar	PEMS
15	C_5	Komatsu	Retroexcavadora	WB-146 Parres	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR AXION
16	C_1a	Komatsu	Retroexcavadora	WB-146 Parres	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION
17	C_4	Komatsu	Dozer	155-AX	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION
18	C_6	New Holland	Tractor	TS- 6020	Topilejo	AVL-MSS ECOSTAR
19	C_2	Volvo	Martilo	EC3308-LC	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR
20	C_11	Komatsu	Cargador Frontal	WA-600	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR AXION
21	C_7	Caterpillar	Dozer	D8T	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR AXION
22	C_10	Cummins	Generador	4B3,9-G1	Planta de Asfalto en Parres	AVL-MSS ECOSTAR AXION
23	C_3	Komatsu	Cargador Frontal	WA-600	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION
24	C_1b	Komatsu	Retroexcavadora	WB-146 Parres	Planta de Asfalto en Imán	AVL-MSS ECOSTAR AXION

Los factores de emisión de gases y de carbono negro obtenidos por las mediciones con la instalación de dispositivos de control de emisiones en los vehículos a diésel fuera de carretera seleccionados se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Factores de emisión [mg/s] y desviación estándar obtenidos con la instalación de dispositivos de control instalados para los vehículos de prueba.

ID	Tipo de vehículo	Vehículo ID	Operación <sup>1</sup>	CO <sub>2</sub> mg/s	CO mg/s	NO <sub>x</sub> mg/s	BC mg/s
C_1	Retroexcavadora	WB-146 Imán	Ralentí	(1497.9, 1581.4)	(1.7, 2.7)	(47.3, 49.6)	(23.8, 27.8)
			Trabajo cubeta	(4710.2, 6410.1)	(4.1, 13.9)	(56.9, 72.7)	(606.6, 2286.1)
C_2	Martillo	EC3308-LC	Ralentí	(7980.6, 8301.3)	(3.5, 8.2)	(72.1, 86.1)	(4.0, 6.6)
			Martillando	(17172.5, 19415.4)	(3.0, 13.5)	(138.3, 154.3)	(18.9, 41.2)
C_3	Cargador frontal	WA-600 Imán	Ralentí	(5535.6, 5845.9)	(4.7, 7.8)	(43.9, 55.2)	(4.0, 4.8)
			Acel. Est. <sup>1</sup> (1190-1216)	(10074.5, 10685.5)	(9.9, 15.2)	(89.7, 105.6)	(9.6, 10.7)
			Acel. Est. (1506-1512)	(14901.2, 15343.5)	(12.2, 18.6)	(180.0, 297.3)	(10.8, 12.8)
			Acel. Est. (1795-1816)	(21320.6, 21776.6)	(18.5, 23.5)	(325.5, 370.2)	(32.7, 43.5)
C_4	Dozer	155-AX	Ralentí	(3170.2, 3302.4)	(2.4, 3.7)	(19.9, 20.6)	(17.3, 18.8)
			Acel. Est. (1252-1280)	(7458.2, 7623.7)	(4.4, 7.1)	(64.0, 71.2)	(5.0, 5.5)
			Acel. Est. (1595-1626)	(12614.1, 12783.6)	(6.8, 10.3)	(101.2, 103.6)	(11.5, 12.5)
			Acel. Est. (1862-1863)	(16988.9, 17471.6)	(8.1, 12.2)	(122.5, 126.4)	(25.6, 35.5)

<b>C_5</b>	Retroexcavadora	WB-146 Parres	Ralentí	(528.8, 950.9)	(2.7, 5.2)	(13.1, 23.6)	(5.4, 10.2)
			Acel. Est. (1056-1060)	(1288.9, 1378.7)	(2.7, 4.3)	(22.3, 27.4)	(22.1, 30.5)
			Acel. Est. (1290-1300)	(1560.2, 1821.2)	(6.2, 8.3)	(27.9, 39.3)	(19.6, 42.7)
			Acel. Est. (1398-1402)	(1729.5, 1777.7)	(3.4, 4.9)	(38.9, 44.2)	(32.3, 50.4)
			Acel. Est. (1480-1530)	(1956.1, 2078.7)	(2.5, 3.7)	(20.7, 25.9)	(45.4, 61.0)
			Acel. Est. (1688-1692)	(1661.0, 2220.2)	(4.8, 11.7)	(21.8, 43.0)	(39.3, 87.6)
			Acel. Est. (1760-1840)	(1974.3, 2448.8)	(4.0, 8.5)	(27.7, 42.3)	(74.2, 122.3)
			Acel. Est. (1910-1925)	(2809.8, 2992.0)	(3.4, 4.2)	(25.7, 27.2)	(128.3, 153.2)
			Acel. Est. (1947-1960)	(2799.4, 3043.2)	(3.5, 4.9)	(26.2, 32.5)	(123.1, 151.8)
			Acel. Est. (2138-2142)	(1681.3, 3319.7)	(3.2, 17.3)	(23.9, 47.5)	(24.8, 128.8)
			Acel. Est. (2180-2200)	(2290.5, 3400.2)	(3.9, 10.7)	(30.5, 46.4)	(176.9, 397.6)
			Acel. Est. (2260-2330)	(2906.7, 3396.4)	(5.5, 9.7)	(45.4, 60.2)	(267.6, 346.0)
<b>C_6</b>	Tractor	TS- 6020	Ralentí	(958.3, 1045.7)	(.9, 10.5)	(10.6, 11.8)	(9.2, 11.9)
			Arando cuesta arriba	(3508.9, 5832.7)	(1.7, 9.2)	(36.1, 46.1)	(404.6, 1490.1)
			Arando cuesta abajo	(1435.5, 1996.1)	(.5, 2.2)	(13.7, 20.1)	(16.0, 43.4)
<b>C_7</b>	Dozer	D8T	Ralentí	(2281.5, 2429.1)	(1.8, 3.7)	(15.4, 34.8)	(.9, 1.3)
			Acel. Est. (958- 962)	(3665.2, 3827.4)	(1.1, 3.1)	(43.3, 47.9)	(1.7, 2.0)
			Acel. Est. (1020-1050)	(3956.3, 4177.9)	(2.5, 4.4)	(34.2, 37.2)	(2.0, 2.4)
			Acel. Est. (1500-1510)	(7279.8, 7526.1)	(4.6, 8.0)	(36.7, 44.5)	(3.1, 3.6)
			Acel. Est. (1750-1800)	(9804.2, 10373.6)	(4.9, 9.8)	(40.1, 65.5)	(7.2, 8.1)
			Acel. Est. (2195-2205)	(14470.0, 15276.2)	(4.5, 17.5)	(56.4, 114.7)	(19.0, 27.1)

<b>C_10</b>	Generador eléctrico	4B3,9-G1	Trabajando	(2159.5, 2180.1)	(34.6, 35.5)	(37.7, 37.9)	(19.0, 21.2)
<b>C_11</b>	Cargador frontal	WA-600 Parres	Ralenti	(5559.4, 6371.9)	(3.2, 6.4)	(39.4, 45.0)	(4.0, 5.7)
			Acel. Est. (1212-1230)	(8581.0, 10482.5)	(9.7, 18.3)	(56.9, 71.1)	(8.7, 12.2)
			Acel. Est. (1268-1272)	(11488.4, 13279.5)	(17.4, 52.2)	(124.4, 137.7)	(40.6, 52.7)
			Acel. Est. (1494-1500)	(12965.3, 15431.4)	(11.9, 23.3)	(85.2, 99.0)	(18.2, 25.2)
			Acel. Est. (1515-1545)	(14849.3, 16120.1)	(8.8, 13.9)	(172.7, 194.8)	(144.1, 282.5)
			Acel. Est. (1790-1805)	(19672.8, 22418.4)	(15.4, 54.9)	(123.4, 153.1)	(315.1, 461.5)

<sup>1</sup>: Acel. Est. Se refiere a mediciones en estado estacionario con aceleración constante del motor (RPM indicados en paréntesis).

Las bases de datos resultantes de las mediciones de campo se anexan en formato electrónico a este reporte.

## 7. Análisis de resultados

### Realización de las pruebas

En cuanto a la organización y planeación de las actividades, es importante mencionar que las numerosas visitas realizadas a las instituciones y particulares propietarias de vehículos a diésel que circulan fuera de carretera fueron esenciales para determinar el universo de posibles vehículos a utilizar durante las mediciones. Además, la constante comunicación entre los miembros del equipo del proyecto y las instituciones participantes fue vital para la elaboración de un calendario de actividades adecuado y suficientemente flexible para cumplir con las metas del proyecto sin alterar en demasía las actividades normales de operación de los vehículos de prueba por parte de sus propietarios.

Similarmente, como resultado de las visitas que fueron realizadas durante la etapa de planeación se pudo reconocer que una vez identificadas las instituciones y particulares participantes en el proyecto, es de suma importancia el establecimiento de canales de comunicación adecuados y eficientes entre los participantes organizadores del proyecto y los encargados de las operaciones de los vehículos y el acceso a las instalaciones para realizar las pruebas.

En el proceso de selección de vehículos de prueba, más de 30 vehículos fuera de carretera fueron analizados en sus condiciones técnicas y diversos criterios no técnicos para determinar su factibilidad de ser utilizados para las pruebas de instalación de dispositivos de control de emisiones. Sin embargo, una consideración a destacar en el proceso de la selección de los vehículos es que, dada la disponibilidad de personal y recursos, los criterios no técnicos fueron también de mucha importancia para la determinación de los vehículos de prueba y de instalación de dispositivos de control. Esto subraya la importancia de la realización de una planeación adecuada de las actividades de pre-selección.

En cuanto a la configuración y calibración de los equipos de muestreo, como resultado de las visitas previas de inspección a los vehículos seleccionados, se fabricaron los aditamentos necesarios para instalar con seguridad los equipos de medición de acuerdo a las características geométricas y de disponibilidad de espacio de cada vehículo seleccionado para las pruebas. Esto fue muy importante para realizar con éxito y seguridad las pruebas.

Los participantes del equipo del proyecto fueron capacitados satisfactoriamente para la operación y la realización de los procedimientos de calibración de los equipos de medición de manera de poder llevar a cabo con eficiencia las actividades de muestreo en los tiempos de calendario seleccionado. Los participantes del proyecto diseñaron un eficiente protocolo de mediciones suficientemente flexible para ser continuamente actualizado antes y durante la campaña según sea necesario por el Investigador Principal en colaboración con los miembros del equipo del proyecto. Un aspecto primordial del proyecto fue la seguridad para todos los participantes. Todas las actividades fueron realizadas utilizando los equipos de protección personal correspondientes.

## **Factores de emisión**

Los factores de emisión obtenidos para la línea base indican una variabilidad importante por tipo de vehículo y por modo de operación. Esto sugiere que una estimación adecuada de las emisiones provenientes de vehículos fuera de carretera en condiciones reales de operación requiere datos de actividad representativos para cada tipo de vehículo. Esta observación es muy importante durante el desarrollo de un inventario de emisiones de vehículos fuera de carretera en México. Las condiciones de operación pueden llegar a ser muy diferentes aun para cada vehículo, lo cual se traduce en la variabilidad observada en los factores de emisión. En el Anexo 6 de muestran algunos ejemplos de las condiciones típicas de operación que se traducen en la variabilidad de las observaciones.

Los factores de emisión de carbono negro provenientes de los vehículos mayores (e.g. cargadores frontales y dozers) fueron muy altas comparadas con los vehículos menores, aun en condiciones de ralentí. Los resultados mostraron que los factores de emisión de carbono negro son sumamente diferentes por tipo de operación del vehículo. Los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub>, fueron también más grandes para los vehículos mayores, pero la variabilidad interna fue menor que para la fase particulada.

Se encontró que la implementación de dispositivos de control de emisiones se tradujo en general en reducciones de los factores de emisión para la fase particulada. Sin embargo, los beneficios asociados fueron muy diferentes por tipo de vehículo presentando algunas reducciones de emisiones muy altas y otros apenas si notables. En general, los vehículos mayores y de mayor potencia de motor (y cuyas emisiones de línea base son más intensas) presentaron los beneficios más grandes con la implementación de dispositivos de control. Cabe mencionar, sin embargo, que los beneficios fueron menores durante condiciones de operación estáticas (es decir ralentí) del vehículo.

## **8. Conclusiones y sugerencias**

En este proyecto se caracterizaron el material particulado y las emisiones gaseosas obtenidas con y sin la aplicación de las tecnologías disponibles de control de emisiones en condiciones reales de operación vehículos a diésel fuera de carretera en México. El

presente reporte incluye las actividades de planeación y organización, selección de los vehículos de prueba, y la descripción de las calibraciones, los métodos de medición utilizados, y los factores de emisión de los vehículos fuera de carretera seleccionados para las pruebas antes y después de la instalación de los dispositivos de control de emisiones. Las actividades del proyecto fueron realizadas exitosamente.

Este proyecto ha producido una abundante base de datos única de factores de emisión por condiciones de funcionamiento de los vehículos fuera de carretera en México. Esta base de datos está disponible para evaluar los impactos de la implementación de tecnologías disponibles de control de emisiones para los vehículos fuera de carretera en México en condiciones de reales de operación y es útil para la construcción de escenarios y medidas de mitigación.

Como parte de las actividades realizadas se contactaron a empresas o personas que cuentan con vehículos que circulan fuera de carretera. Esto nos permitió seleccionar los vehículos de interés para el proyecto de acuerdo al tipo, tamaño, uso, antigüedad, y disponibilidad, principalmente. Las mediciones a los vehículos seleccionados se calendarizaron de acuerdo con la disponibilidad de las instituciones y particulares participantes del proyecto, pero con la limitante de las condiciones meteorológicas imperantes.

Para las plataformas portátiles de medición de emisiones se instalaron en los vehículos de prueba de forma paralela el AVL-MSS y el ECOSTAR y en lo posible el AVL-MSS, el ECOSTAR y el AXION. Con esto se pudo obtener información de las emisiones de carbono negro con el AVL-MSS para cada uno de los vehículos de prueba así como información de las emisiones gaseosas con las otras dos plataformas. Las mediciones se realizaron por periodos de varios minutos dependiendo del tipo de operaciones normales para cada tipo de vehículo durante al menos un día completo de mediciones. Con ello se obtuvo un tamaño de muestra suficientemente grande para cada vehículo y con suficiente repetitividad de los ciclos de operación.

Teniendo en cuenta las reducciones de carbono negro y la masa total de partículas, este estudio se centró en la investigación de las reducciones de las emisiones asociadas a la aplicación de los filtros de partículas diésel (DPF) en los vehículos con motor diésel fuera de carretera en México. Los dispositivos de control de emisiones conocidos como DPF no se encuentran disponibles en México para vehículos fuera de carretera, por ello, fue necesario que fueran diseñados y fabricados específicamente

para cada uno de los vehículos seleccionados, de acuerdo a sus características técnicas y de operación. La selección de los DPF se realizó en conjunto con el fabricante de los dispositivos y la compañía que se encargó de la instalación de los mismos.

Se encontró también que los factores de emisión de carbono negro provenientes de los vehículos a diésel fuera de carretera cuyos motores trabajan a alta potencia fueron muy altas comparadas con los vehículos menores, aun en condiciones de ralentí. Los resultados mostraron que los factores de emisión de carbono negro son sumamente diferentes por tipo de operación del vehículo. Los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub>, fueron también más grandes para los vehículos mayores, pero la variabilidad interna fue menor que para la fase particulada.

Se encontró que la implementación de dispositivos de control de emisiones se tradujo en general en reducciones del factor de emisión para la fase particulada. Sin embargo, los beneficios asociados fueron muy diferentes por tipo de vehículo. En general. Los vehículos mayores (y cuyas emisiones de línea base son más intensas) presentaron los beneficios más grandes con la implementación de dispositivos de control. Cabe mencionar, sin embargo, que los beneficios fueron menores durante condiciones de operación estáticas (es decir ralentí) del vehículo.

Los factores de emisión obtenidos tanto para la fase gaseosa como de carbono negro mostraron una variabilidad importante por tipo de vehículo y por actividad u operación de trabajo del mismo. Esto sugiere que una estimación adecuada de las emisiones provenientes de vehículos fuera de carretera en condiciones reales de operación requiere de un conocimiento detallado de los tiempos de operación de los vehículos, es decir los denominados “datos de actividad”. Esta observación es muy importante durante el desarrollo de un inventario de emisiones de vehículos fuera de carretera en México.

## 9. Bibliografía

Bond, T.C., S.J. Doherty, D.W. Fahey, P.M. Forster, T. Berntsen, B.J. DeAngelo, M.G. Flanner, S. Ghan, B. Kärcher, D. Koch, S. Kinne, Y. Kondo, P.K. Quinn, M.C. Sarofim, M.G. Schultz, M. Schulz, C. Venkataraman, H. Zhang, S. Zhang, N. Bellouin, S.K. Guttikunda, P.K. Hopke, M.Z. Jacobson, J.W. Kaiser, Z. Klimont, U. Lohmann, J.P. Schwarz, D. Shindell, T. Storelvmo, S.G. Warren, and C.S. Zender: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res.*, 118, 5380-5552, doi:10.1002/jgrd.50171, 2013.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT-INE): Inventario Nacional de Emisiones de México, 2008, 2013.

Shindell D, Kuylentierna JC, Vignati E, van Dingenen R, Amann M, Klimont Z, Anenberg SC, Muller N, Janssens-Maenhout G, Raes F, Schwartz J, Faluvegi G, Pozzoli L, Kupiainen K, Höglund-Isaksson L, Emberson L, Streets D, Ramanathan V, Hicks K, Oanh NT, Milly G, Williams M, Demkine V, Fowler D.: Simultaneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improving Human Health and Food Security, *Science* 335, 183-189, 2012.

UNEP/WMO, Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya, 303 pp., 2011.

---

# ANEXO 1

## Compendio de Visitas

### 1. Planta del Asfalto del Gobierno del Distrito Federal

**Dirección:** Av. Del Imán No. 263, Col. Ajusco, Del. Coyoacán, México D.F. C.P. 04300

**Participantes:**

Ing. Reyes Martínez Cordero. Subdirector de Producción de la Planta de Asfalto.  
Luisa Molina, LTMCE<sup>2</sup>  
Marco Balam, Consultor  
Andrés Aguilar, INECC

**Notas:**

1. El combustible que utilizan las unidades es el diésel normal que se comercializa en el Distrito Federal. Los equipos fuera de carretera con que cuenta la Planta de Asfalto son tres (3) con las siguientes características:



**Nombre:** Cargador frontal o trascabo  
**Marca:** Komatsu  
**Modelo:** WA 600  
**Diámetro de chimenea:** 8 pulg.



**Nombre:** Tractor o Bulldozer  
**Marca:** Komatsu  
**Modelo:** D 155 AX  
**Diámetro de chimenea:** 5 pulg.



**Nombre:** Retroescavadora  
**Marca:** Komatsu  
**Modelo:** WB 146  
**Diámetro de chimenea:** 3 pulg.

A) Se revisaron los 3 tipos de vehículo fuera de carretera con que cuenta la Planta de Asfalto. Se realizó una prueba de opacidad por medio de un analizador Bosch. Los resultados de las pruebas de opacidad por tipo de vehículo se muestran a continuación.

Tipo de vehículo	Resultado de prueba de opacidad
	<pre> ***** BOSCH Análisis gases Diesel Informe análisis ----- USM-Euro: V1.80 21.10.98 Vers.RTM: V2.0 02.08.96 ----- PUESTO EJECUTOR ENTE C DIESEL LEON CAVALLO 267 COL VALLEJO C.P.07870 MEXICO D.F. ENT00020P04 TEL 55174571 ----- IDENTIFICACION DE VEHIC. Fabr. : KOMATSU Mod.v.: 2010 Tipo v: WA600 Matr. : CARGADOR F Kilometraje: 9034 Tipo motor: Turbo ----- DATOS CLIENTE PLANTA DE ASFALTO ----- RESULTADOS Control visual: OK ----- Min. real Temp. del aceite [°C]: 80 ----- No. k[1/m] ----- k1 0.87 k2 0.69 k3 0.76 k4 0.74 ----- Valor medio 0.76 OK (k1 - k4) Valor limite k3.00 ----- Prueba superada Sello / Firma </pre>
<p>1) Cargador frontal o trascabo</p>	
<p><b>Marca:</b> Komatsu; <b>Modelo:</b> WA 600; <b>Año modelo:</b> 2010; <b>Kilometraje:</b> 9,034; <b>Motor:</b> turbo; <b>Diámetro de chimenea:</b> 8 pulg.</p>	

**Tipo de vehículo**

**Resultado de prueba de opacidad**



**2) Tractor o Bulldozer**

**Marca:** Komatsu; **Modelo:** D 155 AX; **año modelo:** 2010; **kilometraje:** 6,870; **motor:** turbo; **Diámetro de chimenea:** 5 pulg.

```

*****
  B O S C H
  Análisis gases Diesel
  Informe análisis
-----
USM-Euro: U1.80 21.10.98
Vers.RTM: U2.0 02.08.96
-----
  PUESTO EJECUTOR
  ENTEC DIESEL
  LEON CAVALLO 267
  COL VALLEJO
  C.P.07870 MEXICO D.F.
  ENT08020P04
  TEL 55174571
-----
  IDENTIFICACION DE VEHIC.
  Fabr. :          KOMATSU
  Mod.v.:          2010
  Tipo v.:         155AX
  Matr. :          TRACTOR
  Kilometraje:    6870
  Tipo motor:     Turbo
-----
  DATOS CLIENTE
  PLANTA DE ASFALTO
-----
  RESULTADOS
  Control visual:   OK
-----
  Min.    real
-----
  Temp. del aceite [°C]:
  80      -----
-----
  No.      k[1/m]
-----
  k1       1.11
  k2       1.18
  k3       1.13
  k4       1.21
-----
  Valor medio  1.15   OK
  (k1 - k4)
  Valor limite k3.00
-----
  Prueba superada
  Sello / Firma
  
```

**Tipo de vehículo**

**Resultado de prueba de opacidad**



**3) Retroescavadora**

**Marca:** Komatsu; **Modelo:** WB 146; **año modelo:** 2010; **kilometraje:** 1,115; **motor:** turbo; **Diámetro de chimenea:** 3 pulg.

```

*****
B O S C H
Análisis gases Diesel
Informe análisis
-----
USM-Euro: U1.80 21.10.98
Vers.RTM: U2.0 02.08.96
-----
PUESTO EJECUTOR
ENTECC DIESEL
LEON CAVALLO 267
COL VALLEJO
C.P.07870 MEXICO D.F.
ENT08020P04
TEL 55174571
-----
IDENTIFICACION DE VEHIC.
Fabr. : KOMATSU
Mod.v.: 2010
Tipo v: WB146
Matr. : RETROESC
Kilometraje: 1115
Tipo motor: Turbo
-----
DATOS CLIENTE
PLANTA DE ASFALTO
-----
RESULTADOS
Control visual: OK
-----
Min. real
Temp. del aceite [°C]:
80 -----
No. k[1/m]
-----
k1 2.42
k2 2.40
k3 2.54
k4 2.43
-----
Valor medio 2.44 OK
(k1 - k4)
Valor Limite k3.00
-----
Prueba superada
-----
Sello / Firma

```

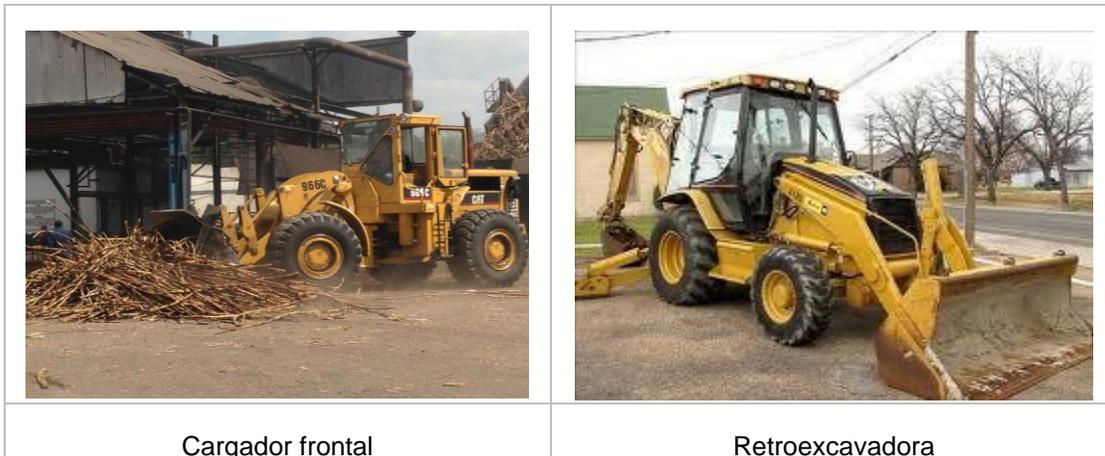
- Adicionalmente a los tres tipos de vehículos que se muestran en este punto, la Planta de Asfalto cuenta, en la localidad de Parres a 25 kilómetros de la Ciudad de México hacia Cuernavaca, con otro tipo de vehículos, conocidos como “fuera de carretera” y los cuales son utilizados principalmente para transportar el material dentro de la planta.
- El combustible que utilizan los vehículos de la planta de asfalto es el diésel normal que se comercializa en el Distrito Federal, es decir, de 15 ppm de contenido de azufre.

## 2. Ingenio Azucarero “Emiliano Zapata” de Zacatepec, Morelos

**Dirección:** Av. Lázaro Cárdenas No. 51, Zacatepec, Morelos, México.

### Notas:

1. Los equipos fuera de carretera que son utilizados para cubrir las actividades del Ingenio Azucarero se pueden clasificar en dos tipos:
  - Equipo de Planta. Equipo fuera de carretera dedicado a descargar de los camiones que transportan la caña de azúcar hacia el ingenio azucarero e ingresarla al proceso de trituración de la Planta. Para esta actividad se utilizan los siguientes tipos de equipos: cargador frontal y retroexcavadora. El cargador frontal trabaja hasta por 18 horas en varios turnos, aunque se puede llegar a mantener trabajando todo el día. Por el contrario, la retroexcavadora es utilizada solo eventualmente.



- Equipo de Campo. Equipo fuera de carretera utilizado en los campos de cultivo para realizar tareas de preparación del terreno para preparar la tierra de cultivo, así como sembrar, fertilizar y cortar la caña, además de cargar los camiones que la transportarán al Ingenio Azucarero. Para esta actividad se utilizan los siguientes tipos de vehículo: moto-conformadoras, tractores, cortadoras/picadoras, aplicadores de fertilizantes y alzadoras (cargar la caña de azúcar en los camiones). Durante el periodo de cosecha, los equipos que son utilizados con mayor intensidad son las cosechadoras y las alzadoras.

Cabe mencionar, que la maquinaria utilizada en el trabajo de campo no pertenece al Ingenio Azucarero, sino que ésta es propiedad de asociaciones de cañeros, como “Cañeros, Ingenio Emiliano Zapata” (CNRP), por lo tanto, si se

requiere utilizar alguno de estos equipos para el estudio, será necesario hacer las gestiones correspondientes con esta asociación y en conjunto con la Gerencia General del Ingenio Azucarero.

	
<p>Moto-conformadora</p>	<p>Tractores</p>
	
<p>Cortadora/picadora</p>	<p>Alzadora</p>

Un aspecto muy importante que se observó durante la visita a los equipos utilizados en los campos de cultivo es su intensa movilidad y vibración al realizar sus actividades. Esto se debe principalmente a lo accidentado del terreno por los surcos en el campo de cultivo y al inherente trabajo rudo durante las operaciones de corte y alzado. También es importante la gran cantidad de polvo generado durante la realización de estas actividades. Estas condiciones podrían no ser las ideales para colocar los equipos de medición en este tipo de vehículos, o en caso contrario, se tendría que realizar ajustes adicionales para proteger el equipo y sujetarlo firmemente a los vehículos o asegurar su operación en terrenos homogéneos en condiciones controladas.

2. El combustible que utilizan las unidades es el diésel típico que se comercializa en la zona de Morelos, es decir, diésel con contenido de azufre de 350 ppm. Esto es importante durante la selección y diseño de los equipos de control de emisiones que se pudieran instalar en los vehículos.
3. Un aspecto importante que impacta el uso de los vehículos fuera de carretera utilizados en el Ingenio Azucarero (tanto dentro de la planta de operaciones como los vehículos utilizados en el campo), es que su periodo de trabajo no coincide con los tiempos de trabajo del proyecto de emisiones.

### 3. Dirección General de Servicios Urbanos / Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal

**Dirección:** Río Churubusco 1,155. Colonia Carlos Zapata Vela. Delegación Iztacalco.

**Notas:**

1. Los vehículos que se utilizan en la Dirección son empleados durante las emergencias o catástrofes (derrumbes, accidentes, etc.) como es requerido por el Gobierno de la Ciudad durante esas necesidades. Debido a ello, la Dirección no puede prescindir de los vehículos por mucho tiempo y, en caso de necesidad, su empleo en estas actividades es prioridad sobre su empleo en las mediciones. Por las mismas razones, durante las mediciones los equipos deberán permanecer todo el tiempo dentro de las instalaciones de la Dirección y a la disposición de la misma.
2. La Dirección manifestó que en su mayoría los vehículos fuera de carretera que ellos utilizan no reciben un mantenimiento preventivo periódico, sino únicamente mantenimiento correctivo cuando surge un desperfecto en los mismos. Una excepción de ello es una retroexcavadora Caterpillar de reciente adquisición la cual si cuenta con un mantenimiento preventivo cada 500 horas.
3. Todos los vehículos fuera de carretera que se utilizan por parte de la Dirección emplean combustible diésel típico adquirido en gasolineras ubicadas en el Distrito Federal, lo cual indica que es de ultra bajo azufre.

<b>Retroexcavadora</b>	
	
Marca: Caterpillar	
Modelo: Unknown	
Año Modelo: 2014	

<p><b>Compactador</b></p>	
	
<p>Marca: AMM</p>	
<p>Modelo: HD90</p>	
<p>Año Modelo: 2009-2010</p>	
<p>Motor: Turbo</p>	
<p>Tipo: DEUS</p>	
<p><b>Retroexcavadora</b></p>	
	
<p>Marca: JCB</p>	
<p>Modelo: JCB-3CX</p>	
<p>Año Modelo: 2011</p>	

#### 4. Dirección General de Proyectos Especiales de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal: Proyectos Especiales

**Notas:** Personal de la Dirección General de Proyectos Especiales comentó que cuentan con tres trenes de pavimentación, cada tren cuenta con el siguiente equipo: una barredora, una fresadora, una pavimentadora, dos aplanadoras y una retroexcavadora. Estos equipos son utilizados para re-encarpetar y están en constante movimiento, de acuerdo a los sitios de la ciudad donde se requieran sus servicios.



1) Rodillo neumático HAMM



2) Vibro compactador HAMM



3) Barredora Broce Broom



4) Retro-excavadora Caterpillar



5) Finisher o asfaltadora Roadtec



6) Fresadora Roadtec

## 5. Topilejo

**Dirección:** Cuahutémoc #50, San Miguel Topilejo, Tlalpan, Distrito Federal

### Notas

- 1) Los productores mencionaron que del 70 al 80% de los tractores son viejos (<1990). Los agricultores prefieren tractores viejos por que requieren de menos mantenimiento y las piezas son más baratas.
- 2) Cada agricultor se hace cargo del mantenimiento preventivo de los tractores. Cambio de aceite y filtro.
- 3) El periodo con mayor actividad es entre Noviembre y Febrero. Los tractores se usan entre las 7:00 am y las 3:00 pm. A partir de Junio, las actividades se reducen drásticamente

### Tipo de Vehículo: Tractores



Marca: New Holland; Massey Ferguson

Modelo: TS6020; 285

Año Modelo: 2009, 1981

## 6. Planta del Asfalto del Gobierno del Distrito Federal

**Dirección:** Localidad de Parres, localizada a 25 kilómetros de la Ciudad de México hacia Cuernavaca Del. Tlalpan, México D.F.

### Notas:

- 1) Los equipos fuera de carretera con que cuenta la Planta de Asfalto tienen las siguientes características:

		
<p><b>Nombre:</b> Camión fuera de carretera  <b>Marca:</b> Caterpillar; <b>Modelo:</b> 770; <b>Año-modelo:</b> 2008  <b>Cantidad:</b> 1 vehículo</p>		
		
<p><b>Nombre:</b> Camión fuera de carretera  <b>Marca:</b> TEREX; <b>Modelo:</b> 33-05; <b>Año-modelo:</b> P. Se mencionó por parte del personal de mantenimiento que pudieran tener más de 15 años.  <b>Cantidad:</b> 3 vehículos</p>		



**Nombre:** Tractor o Bulldozer  
**Marca:** Caterpillar  
**Modelo:** D8T  
**Cantidad:** 1 vehículo



**Nombre:** Retroescavadora o martillo  
**Marca:** VOLVO  
**Modelo:** EC330 BLC  
**Cantidad:** 1 vehículo



**Nombre:** Cargador de "Quijada"  
**Marca:** Caterpillar  
**Modelo:** 5080  
**Cantidad:** 1 vehículo



**Otros vehículos observados:**

- 2 cargadores frontales marca KOMATSU
- Una retroexcavadora marca KOMATSU

- 2) El área de extracción y triturado de material de la Planta de Asfalto localizada en Parres trabaja de 7:00 AM a 15:00 PM. Bajo este esquema de trabajo y si los vehículos de este lugar son seleccionados para el proyecto, se podría pensar en trabajar con ellos durante las tardes para no interferir en sus actividades.
- 3) Otra posibilidad de trabajo en la etapa de medición de emisiones es utilizar los vehículos fuera de carretera en las horas que no laboran y simular su actividad cotidiana en sus áreas de trabajo.
- 4) El mantenimiento preventivo de los vehículos se da cada 250 horas de operación que corresponden aproximadamente a 20 días de trabajo. El mantenimiento está compuesto básicamente por cambio de aceite y filtros.
- 5) El combustible que utilizan las unidades es el diésel normal que se comercializa en el Distrito Federal. El combustible utilizado por la maquinaria de este lugar es transportado en un auto-tanque de los tanques de almacenamiento localizados en la Planta de Asfalto ubicada en Av. Del Imán en la Ciudad de México. El transporte del combustible se realiza normalmente cada tercer día en una cantidad de 2 mil a 2 mil 500 litros y en Parres es almacenado en tanques de 200 litros.

## ANEXO 2

### Lista de Vehículos que se visitaron inicialmente y sus requerimientos y recomendaciones para su medición

Tipo de Vehículo	Modelo	Potencia	Año	Institución	Criterios	Recomendación
Cargador Frontal	Caterpillar 966C 	170 HP	-	Ingenio Azucarero, Zacatepec	<b>Sitio:</b> Zacatepec <b>Seguridad:</b> Si <b>Espacio para el equipo:</b> Si <b>Espacio para las pruebas:</b> Si <b>Opacidad:</b> NA <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación. <b>Observaciones:</b> Muy lejos del DF para transportar los instrumentos y los operadores.	No se recomienda para su medición
	Komatsu WA600 	530 HP	2010	Planta de Asfalto de Av. Del Imán	<b>Sitio:</b> Av. Imán. <b>Seguridad:</b> Si <b>Espacio para el equipo:</b> Si <b>Espacio para las pruebas:</b> Si <b>Opacidad:</b> K: 0.76 m-1 <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación. <b>Observaciones:</b> Se necesita confirmar espacio para los instrumentos y accesibilidad del escape.	Recomendado para línea base debido a que DPF tiene un costo muy elevado.
Compactador	HAMM HD90	134 HP	2009	Obras	<b>Sitio:</b> Secretaría de Servicios	Recomendado para

				Públicas	Urbanos D.F. <b>Seguridad:</b> Si <b>Espacio para el equipo:</b> No <b>Espacio para las pruebas:</b> No <b>Opacidad:</b> 1.96 (alta) <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación. <b>Observaciones:</b> Se usa solo en emergencias, tiene muy baja vibración pero el escape esta debajo del vehículo y muy difícil de alcanzar.	la línea base pero con alta dificultad para instalar el puerto de muestreo
	Hamm, HD90 	134 HP	2010	Obras Públicas, Proyectos Especiales	<b>Sitio:</b> Indeterminado <b>Seguridad:</b> NO <b>Espacio para el equipo:</b> Si <b>Espacio para las pruebas:</b> No <b>Opacidad:</b> 3.6 m-1 <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación. <b>Observaciones:</b> Su uso depende de la temperatura del asfalto, No hay espacio para la instalación de los instrumentos, no hay seguridad y el escape es muy difícil de alcanzar	Recomendado pero con baja prioridad debido a las restricciones de baja disponibilidad. Solo mediciones de emisiones gaseosas.
Retro-excavadora	JCB – 3CX	85 HP	2011	Obras Públicas	<b>Sitio:</b> Secretaría de Servicios Urbanos D.F. <b>Seguridad:</b> Sí <b>Espacio para el equipo:</b> Sí <b>Espacio para las pruebas:</b> No <b>Opacidad:</b> 1.74 (alta) <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de	Recomendado para el experimento y candidato a usar un DPF

					operación. <b>Observaciones:</b> Se usa de emergencia. Tiene espacio para los instrumentos y para el GenSet.	
	Caterpillar 	85 HP	2011	Obras Públicas	<b>Sitio:</b> Secretaría de Servicios Urbanos D.F. <b>Seguridad:</b> Sí <b>Espacio para el equipo:</b> Sí <b>Espacio para las pruebas:</b> No <b>Opacidad:</b> 0.73 (bajo) <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación. <b>Observaciones:</b> Se usa de emergencia. Tiene espacio para los instrumentos y para el GenSet.	Recomendado para el experimento y candidato a usar un DPF
	Komatsu WB146 	88 HP	2010	Planta de Asfalto de Av. del Imán	<b>Sitio:</b> Planta de Asfalto de at Imán <b>Seguridad:</b> Si <b>Espacio para el equipo:</b> Si <b>Espacio para las pruebas:</b> Si <b>Opacidad:</b> 2.44 (alta) <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación. <b>Observaciones:</b> Se necesita confirmar espacio para los instrumentos.	Recomendado para el experimento y candidato a usar un DPF
	Caterpillar			Obras Públicas,	<b>Sitio:</b> Indeterminado <b>Seguridad:</b> NO	Recomendado pero con baja prioridad

			N/A	Proyectos Especiales	<p><b>Espacio para el equipo:</b> Si</p> <p><b>Espacio para las pruebas:</b> No</p> <p><b>Opacidad:</b> Pendiente</p> <p><b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.</p> <p><b>Observaciones:</b> Su uso depende de la temperatura del asfalto, No hay espacio para la instalación de los instrumentos, no hay seguridad</p>	debido a las restricciones de baja disponibilidad
Rubber wheeled roller	<p>Hamm, GRW15</p> 	114 HP	2010	Obras Públicas, Proyectos Especiales	<p><b>Sitio:</b> Indeterminado</p> <p><b>Seguridad:</b> NO</p> <p><b>Espacio para el equipo:</b> Si</p> <p><b>Espacio para las pruebas:</b> No</p> <p><b>Opacidad:</b> 3.6 m-1</p> <p><b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.</p> <p><b>Observaciones:</b> Su uso depende de la temperatura del asfalto, No hay espacio para la instalación de los instrumentos, no hay seguridad.</p>	Recomendado pero con baja prioridad debido a las restricciones de baja disponibilidad
Fresadora	Roadtech, RX500	500 HP	2010	Obras Públicas, Proyectos Especiales	<p><b>Sitio:</b> Indeterminado</p> <p><b>Seguridad:</b> NO</p> <p><b>Espacio para el equipo:</b> Si</p> <p><b>Espacio para las pruebas:</b> No</p> <p><b>Opacidad:</b> N/A</p> <p><b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.</p> <p><b>Observaciones:</b> Su uso depende de la temperatura del asfalto, No hay espacio para la instalación de los instrumentos, no hay seguridad.</p>	Recomendado pero con baja prioridad debido a las restricciones de baja disponibilidad

Dozer	<p>Komatsu 155AX</p> 	354 HP	2010	Planta de Asfalto de, Av. Imán	<p><b>Sitio:</b> Av. Imán. <b>Seguridad:</b> Si <b>Espacio para el equipo:</b> Si, en el techo <b>Espacio para las pruebas:</b> Si <b>Opacidad:</b> K: 0.76 m-1 <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación. <b>Observaciones:</b> Es necesaria otra visita.</p>	Se recomienda para experimento
Escoba Broce		N/A HP	N/A	Obras Públicas, Proyectos Especiales	<p><b>Sitio:</b> Indeterminado <b>Seguridad:</b> NO <b>Espacio para el equipo:</b> No <b>Espacio para las pruebas:</b> No <b>Opacidad:</b> N/A <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación. <b>Observaciones:</b> Su uso depende de la temperatura del asfalto, No hay espacio para la instalación de los instrumentos, no hay seguridad y tiene fugas en el escape.</p>	No se recomienda por la edad
Tractor	<p>Ford 6600</p> 	77 HP	1981	Topilejo	<p><b>Sitio:</b> Topilejo <b>Seguridad:</b> No <b>Espacio para el equipo:</b> No <b>Espacio para las pruebas:</b> No <b>Opacidad:</b> N/A <b>Mantenimiento:</b> Muy Limitado. <b>Observaciones:</b> Muy viejo, sin mantenimiento, sin instalaciones para colocar los instrumentos, sin seguridad</p>	No se recomienda por la edad

	<p>Massey Ferguson 285</p> 	N/A	1985	Topilejo	<p><b>Sitio:</b> Topilejo  <b>Seguridad:</b> No  <b>Espacio para el equipo:</b> No  <b>Espacio para las pruebas:</b> No  <b>Opacidad:</b> N/A  <b>Mantenimiento:</b> Muy Limitado.  <b>Observaciones:</b> Muy viejo, sin mantenimiento, sin instalaciones para colocar los instrumentos, sin seguridad</p>	No se recomienda por la edad
		110 HP	N/A	Topilejo	<p><b>Sitio:</b> Topilejo  <b>Seguridad:</b> Si  <b>Espacio para el equipo:</b> No  <b>Espacio para las pruebas:</b> No  <b>Opacidad:</b> N/A  <b>Mantenimiento:</b> Limitado.  <b>Observaciones:</b> Vehículo nuevo con instalaciones para instalar los instrumentos y seguridad disponible</p>	Recomendado para Línea base y DPF
Camión de Volteo	<p>Caterpillar 770</p> 	N/A	2008	Planta de Asfalto de Parres	<p><b>Sitio:</b> Parres  <b>Seguridad:</b> Si  <b>Espacio para el equipo:</b> Si  <b>Espacio para las pruebas:</b> Si  <b>Opacidad:</b> N/A  <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.  <b>Observaciones:</b> Excelente candidato pero un alto costo de DPF debido a su tamaño</p>	Recomendado para Línea Base: El costo del DPF es muy alto.
	<p>Terex 33-05B</p>	N/A	>25 años	Planta de Asfalto de Parres	<p><b>Sitio:</b> Parres  <b>Seguridad:</b> Si  <b>Espacio para el equipo:</b> Si</p>	No se Recomienda

					<p><b>Espacio para las pruebas:</b> Si  <b>Opacidad:</b> N/A  <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.  <b>Observaciones:</b> Dos vehículos disponibles pero muy viejos y con dos escapes dependiendo de la actividad del vehículo.</p>	
Dozer	<p>Caterpillar D8T</p> 	N/A	N/A	Planta de Asfalto de Parres	<p><b>Sitio:</b> Parres  <b>Seguridad:</b> Si  <b>Espacio para el equipo:</b> Si  <b>Espacio para las pruebas:</b> Si  <b>Opacidad:</b> N/A  <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.  <b>Observaciones:</b></p>	Recomendado para Línea Base
Pala Frontal	<p>Caterpillar 5080</p> 	N/A	N/A	Planta de Asfalto de Parres	<p><b>Sitio:</b> Parres  <b>Seguridad:</b> Si  <b>Espacio para el equipo:</b> Si  <b>Espacio para las pruebas:</b> Si  <b>Opacidad:</b> N/A  <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.  <b>Observaciones:</b> Excelente candidato pero con alta vibración y un alto costo de DPF</p>	Recomendado para Línea Base
Excavador Hidráulico	<p>Volvo</p>	N/A	N/A	Planta de Asfalto de Parres	<p><b>Sitio:</b> Parres  <b>Seguridad:</b> Si  <b>Espacio para el equipo:</b> Si  <b>Espacio para las pruebas:</b> Si</p>	Recomendado para el experimento pero requiere de verificación de

					<p><b>Opacidad:</b> N/A  <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.  <b>Observaciones:</b> Excelente candidato pero con alta vibración</p>	<p>vibración.</p>
<p>Cargador Frontal</p>		<p>N/A</p>	<p>N/A</p>	<p>Planta de Asfalto de Parres</p>	<p><b>Sitio:</b> Parres  <b>Seguridad:</b> Si  <b>Espacio para el equipo:</b> Si  <b>Espacio para las pruebas:</b> Si  <b>Opacidad:</b> N/A  <b>Mantenimiento:</b> Preventivo de acuerdo a los manuales de operación.  <b>Observaciones:</b> Tres vehículos adicionales para el estudio (Retroexcavadora Komatsu, dos cargadores frontales, Komatsu). No se pudieron revisar durante visita a la planta.</p>	<p>Recomendado para el experimento pero requiere de verificación de vibración.</p>

---

## ANEXO 3

### Protocolo de Mediciones

El siguiente protocolo de mediciones está destinado a ser continuamente actualizado antes y durante la campaña según sea necesario por el Investigador Principal en colaboración con los miembros del equipo del proyecto.

Un aspecto primordial del proyecto es la seguridad para todos los participantes. Todas las actividades deben ser realizadas por personal calificado y siguiendo los procedimientos de seguridad revisados por todos los participantes.

---

#### A. Preparación

1. Revisar con los anfitriones y colaboradores los procedimientos y requisitos para las pruebas. Esto incluye:
    - Confirmar el tipo de ciclo de operaciones durante las mediciones: Prescritas vs. Condiciones Reales.
    - Confirmar el numero e identidad de los vehículos a utilizar
    - Confirmar el tiempo y días de disponibilidad para las mediciones
    - Confirmar el aspecto de seguridad de los equipos
    - Confirmar las agendas de mantenimiento de los vehículos y asegurar el que exista interferencia con el periodo de pruebas
  2. Registrar las especificaciones técnicas de los vehículos de prueba
  3. Revisar e inspeccionar el estado mecánico y de mantenimiento de los vehículos de prueba
  4. Comprobar la integridad estructural de los vehículos y sistema de escape
  5. Identificar posibles problemas de seguridad
  6. Determinar la disponibilidad de espacio para la instalación de los equipos de medición
  7. Medir el diámetro del tubo de escape del vehículo de prueba
  8. Registrar la disponibilidad eléctrica en el sitio
  9. Determinar la disponibilidad de espacio en los vehículos para realizar la instalación de equipos
  10. Diseñar y construir la estructura de metal que contendrá los equipos
  11. Determinar y obtener los aditamentos necesarios para la instalación de los equipos
-

## **B. Día -1 (Instalación)**

1. Asegurar el acceso a las llaves de los vehículos de prueba y la presencia de personal de la institución anfitriona. **Realizado por: Responsable Técnico.**
2. Verificar la disponibilidad de los artículos y accesorios para los equipos. **Realizado por: Responsable Principal.**
3. Revisar la disponibilidad de corriente eléctrica. **Realizado por: Responsable Técnico.**
4. Verificar la ubicación para la instalación de equipos de medición. **Realizado por: Responsable Técnico y Operadores de PEMS.**
5. Instalar y asegurar la estructura de metal al vehículo de prueba. **Realizado por: Todos**
6. Instalar y asegurar los equipos en la estructura de metal sobre el vehículo de prueba. **Realizado por: Todos.**
7. Revisar la disponibilidad de la conexión al generador portátil. **Realizado por: Responsable Técnico.**
8. Instalación del puerto y línea de muestreo. **Realizado por: Todos**
9. Verificar la orientación del puerto y la línea de muestreo
10. Conectar y revisar los accesorios a los equipos. **Realizado por: Responsable Técnico y Operadores de PEMS.**
11. Conectar y revisar las conexiones eléctricas al generador eléctrico. **Realizado por: Responsable Técnico.**
12. Realizar la prueba de verificación de la correcta instalación y funcionamiento (ej. verificar adquisición de datos) de los equipos de medición utilizando el vehículo de prueba encendido. Seguir los procedimientos de muestreo preestablecidos para cada equipo. **Realizado por: Responsable Técnico y Operadores de PEMS.**
13. Sincronizar tiempos de muestreo en las computadoras de adquisición de datos: Utilizar la primera pluma de humo para ello. **Realizado por: Responsable Técnico.**
14. Realizar la evaluación de los datos obtenidos. Merece atención especial la inter-comparación de la medición de CO<sub>2</sub> (contaminante común a los tres equipos). Resolver problemas y atender observaciones, según sea necesario. **Realizado por: Operadores de PEMS.**
15. Inspeccionar visualmente la instalación y verificar la integridad de los equipos. **Realizado por: Responsable Principal.**

- 
16. Apagar equipos y desconectar la energía eléctrica principal. Corroborar esto con los requerimientos de cada equipo. **Realizado por: Operadores de PEMS.**
  17. Revisar la integridad de los equipos con el personal de seguridad en el sitio de muestreo. Tomar fotografías del equipo instalado. **Realizado por: Responsable Técnico.**
  18. Cubrir los equipos y generador eléctrico. **Realizado por: todo el equipo técnico.**

### C. Día 0 (Muestreo)

1. Verificar que todo el personal tenga puesto el equipo de seguridad: goggles, casco, chaleco reflejante, tapones para oídos y algunos guantes.
2. Revisar la instalación del día anterior con ayuda del registro visual creado. **Realizado por: todo el equipo técnico.**
3. Confirmar que generador eléctrico contenga suficiente combustible.
4. Encender el generador eléctrico y conectar los equipos a la toma de corriente eléctrica. **Realizado por: Operadores de PEMS.**
5. Encender los equipos de medición. Realizar procedimientos de calentamiento de cada equipo (1 hora min). **Realizado por: Operadores de PEMS.**
6. Verificar la alineación de tiempo para las computadoras (SNAP acceleration). **Realizado por: Responsable Principal.**
7. Medir el combustible antes del inicio de la prueba. **Realizado por: Responsable Técnico.**
8. Revisar con los operadores de los vehículos, los objetivos y procedimientos (principalmente aspectos de seguridad de los equipos y tiempos necesarios para detener el muestreo) a seguir durante las pruebas. **Realizado por: Responsable Principal.**
9. Realizar la adquisición de datos.
10. Después de cada prueba, recuperar datos y revisar la correcta adquisición de los mismos. Por favor, asegúrese de que la recuperación de datos se realiza en un entorno seguro y protegido (ej. vehículo apagado). **Realizado por: Operadores de PEMS.**
11. Medir el consumo de combustible al final de cada ciclo de operación. **Realizado por: Responsable Técnico.**
12. Repetir la prueba (se sugieren al menos 3 pruebas por cada vehículo) según sea necesario.
13. Respaldar los datos de todos los equipos de medición. **Realizado por: Responsable Principal.**
14. Realizar reunión de pre-análisis de datos y determinar si existe la necesidad de realizar mediciones adicionales para ese vehículo sobre la base de los datos obtenidos. **Realizado por: todo el equipo técnico.**
15. Desmontar el equipo en un entorno seguro y protegido. **Realizado por: todo el equipo técnico.**

## ANEXO 4

### NOTAS DE LA REUNIÓN

#### LUGAR Y FECHA:

- Instalaciones de la Planta de Asfalto del Gobierno del Distrito Federal. Av. Del Imán No. 263, Col. Ajusco, del. Coyoacán, México, D.F. *Jueves 11 de septiembre a las 11:00 a.m.*

#### PARTICIPANTES:

- LTM Center for Energy and the Environment, A.C.:
  - Dra. Luisa Molina
  - Fis. Marco Balam
- Planta de Asfalto del Gobierno del Distrito Federal:
  - Ing. Reyes Martínez Cordero.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático:
  - Ing. Sergio Zirath
  - Ing. Andrés Aguilar

#### OBJETIVO:

- Sostener una reunión de planeación para acordar los pasos siguientes del estudio de emisiones para vehículos fuera de carretera.

#### ASPECTOS COMENTADOS:

##### 1. Propuesta de calendario de medición de campaña de medición de emisiones.

El grupo de trabajo, en conjunto con el Ingeniero Reyes, acordó las fechas de medición de los vehículos fuera de carretera de la Planta de Asfalto, localizados en Av. Del Imán Parres, de acuerdo a lo que se muestra en el cronograma de actividades. Se evaluarán seis vehículos de la Planta de Asfalto, tres de Av. Del Imán y 3 en Parres. Algunos de los principales puntos a señalar son los siguientes:

- **Vehículos de Av. Del Imán:**
  - Estos vehículos podrán medirse en los días entre semana, es decir, de lunes a viernes. Se podrán instalar los equipos de medición a partir de las 11:00 hrs. y hasta las 16:00 hrs., cuando inicien nuevamente operación los vehículos fuera de carretera.
  - Una vez terminada la medición de emisiones, los equipo de medición deberán desinstalarse de los vehículos para que continúen con su operación normal. Si por cuestiones meteorológica o problemas técnicos no se pudiera realizar la medición de emisiones, se reprogramará la medición para e día siguiente u otro día, de acuerdo a la disponibilidad de los vehículos.
- **Vehículos de Parres:**
  - Debido a la carga de trabajo entre semana en las instalaciones de Parres (actualmente trabajan de lunes a viernes de las 9:00 a las 20:00 hrs.), la

medición de emisiones de estos vehículos se realizará el fin de semana. Existe la posibilidad de instalar los equipos de medición el viernes y realizar las mediciones el sábado.

## **2. Protocolo de medición.**

- **Mediciones en operación real del vehículo o con ciclos controlados.**

Algunos vehículos, como por ejemplo la retroexcavadora de Av. Del Imán y otros de Parres, estarán disponibles el día completo para los trabajos que se requieran para el proyecto, por lo que puede existir la posibilidad de que realicen algunas rutinas controladas. Sin embargo, hay otros vehículos, que por sus actividades propias deberán ser medidos en operación real.

- **Acondicionamiento de los vehículos para realizar las mediciones.**

Con relación al orificio que requiere realizarse a los vehículos antes del motor para tomar la presión para la operación del AXION, esta posibilidad se evaluará en conjunto con el equipo mecánico de la Planta de Asfalto.

## **3. Mantenimiento de los vehículos.**

- El personal de la Planta de Asfalto proporcionará al equipo del proyecto el historial de mantenimiento de los vehículos fuera de carretera a ser medidos.

## **4. Fechas de medición**

- El inicio de las mediciones de la línea base será el próximo 18 septiembre y terminará el 5 de octubre de este año.
- Se realizarán los arreglos necesarios para llevar a cabo la segunda parte del proyecto (con dispositivos de control).

## **ACUERDOS:**

- Por parte del Equipo Técnico de Trabajo del Proyecto, se enviará al Director General de la Planta de Asfalto y al Ingeniero Reyes la versión final del calendario de medición de emisiones.
- Los días 11 y 12 de septiembre se permitirá el ingreso del Equipo Técnico del Proyecto en las instalaciones de Av. Del Imán, con la finalidad de realizar pruebas de la instalación de los equipos de medición en los vehículos fuera de carretera que serán medidos. Así mismo, se permitirá el Ingreso a las Instalaciones de Av. Del Imán y Parres a personal técnico para el diseño de los acoplamientos del escape del vehículos a los equipos de medición.

## ANEXO 5

### Bitácora de Campo – A. Datos técnicos del vehículo

Elemento	Descripción
<b>Vehículo ID</b>	36-21
<b>Propietario</b>	Planta de asfalto en Imán
<b>Tipo de equipo<sup>1</sup></b>	Retroexcavadora
<b>Características del vehículo</b>	
Fabricante	Komatsu
Modelo	WB146
Año modelo	2010
Voltaje (12V, 24 V)	2 (12)
<b>Características del motor</b>	
Fabricante	Komatsu
Modelo	S4D102LE-2
Año Modelo	2010
Desplazamiento (litros)	4.5
Configuración (e.g. V, in-line)	V
Compresión	NA
Potencia en bhp	92
Velocidad en RPM	2200
No. De cilindros	4
Turbocargador	Si
Recirculación de gases?	No
Tier	NA
Horas de operación	1115
Familia del motor <sup>2</sup>	7KLXL0275AAC
Lug curva (Y/N)	N
Max. temperatura de salida de los gases (°C)	>300
Ubicación del motor	Parte trasera
<b>Combustible</b>	Diesel de ultra bajo azufre adquirido en las estaciones de combustible del Distrito Federal
<b>Observaciones</b>	07 de octubre de 2014. El vehículo fue puesto a disposición para la prueba a las 12:00 PM. Anotaciones hechas por Miguel Zavala

<sup>1</sup> e.g. Pala cargadora de ruedas, excavadoras, tractores, scrapper, carretilla elevadora, retroexcavadora, etc.

<sup>2</sup> EPA Nombre familia de motores: Se puede encontrar en la etiqueta de emisiones del motor y contiene 12 a 13 caracteres.

## Bitácora de Mediciones – B. Descripción de la prueba

Elemento	Descripción
<b>Vehículo ID</b>	36-21
<b>Propietario</b>	Planta de asfalto en Imán
<b>Tipo de equipo</b>	Retroexcavadora
<b>Características del vehículo</b>	
Fabricante	Komatsu
Modelo	WB146
Año modelo	2010
<b>Hora inicial de la prueba</b>	4:27 PM
<b>Operador</b>	Mtro. Alfonso
<b>Nombre de los participantes en la prueba</b>	Marco B., Francisco G., Daniel P., Miguel Z.
<b>Descripción de la prueba</b>	<p>Prueba A (para cubeta grande): 1) la Cubeta "ataca" el montón de tierra comenzando desde la velocidad cero, 2) elevación de pila de tierra, 3) traslado (unos 5 metros) y se mueve a la derecha, 4) se detiene y cae la carga, 5) retrocede y se mueve al punto de partida</p> <p>Prueba B (para cubeta pequeña): 1) Se posiciona arriba del montículo y "ataca", 2) elevación de la pila de tierra, 3) brazo gira alrededor de 80 grados a la derecha, 4) la carga cae, 5) el brazo devuelve al punto de partida.</p>
<b>Combustible</b>	Diesel de ultra bajo azufre adquirido en las estaciones de combustible del Distrito Federal
<b>Nivel de combustible</b>	3/4
<b>Horas de trabajo de la maquina</b>	1200
<b>Narrativa</b>	
Hora/Minuto	Descripción
4:27	Vehículo deja área del taller mecánico hacia zona de pruebas
4:32	El vehículo llega a la zona de prueba
	Los procedimientos de prueba se discuten con el operador del vehículo

	La inspección visual de seguridad de la instalación y equipos
4:35	Prueba A comienza
	Plumas visibles durante los períodos de aceleración (a partir de la velocidad cero)
4:45	Final primera prueba
	Comprobación de las computadoras y el registro de datos; comprobación de aire cero; realizar standby
	Inspección visual de seguridad de la instalación y equipos
4:49	Examen Segundo (A) comienza
4:51	Prueba se detiene temporalmente por perder correa para el generador eléctrico
4:54	En espera de reducción a cero
4:57	Continuar segunda prueba
	Condiciones de trabajo son duras (estilo de conducción)
5:09	Terminar segunda prueba
	Comprobación de las computadoras y el registro de datos; comprobación de aire cero; realizar standby
	Inspección visual de seguridad de la instalación y equipos
5:12	Iniciar tercera prueba (A)
5:22	Terminar tercera prueba
	Comprobación de las computadoras y el registro de datos; comprobación de aire cero; realizar de espera
	La inspección visual de seguridad de la instalación y equipos
5:27	Prueba(B) comienza
	Motor funciona con RPM constante durante las pruebas
5:37	Final primera prueba
5:40	Prueba (B) segunda comienza
5:50	Final segunda prueba

	Comprobación de las computadoras y el registro de datos; comprobación de aire cero; realizar de espera
	Inspección visual de seguridad de la instalación y equipos
5:53	Prueba (B) comienza
6:03	Final tercera prueba
	Comprobación de las computadoras y el registro de datos; comprobación de aire cero; realizar de espera
	Inspección visual de seguridad de la instalación y equipos
	Regreso al área del taller mecánico
	Realizar calibraciones durante el ralentí

## ANEXO 6

### Contaminantes medidos para los vehículos fuera de carretera seleccionados

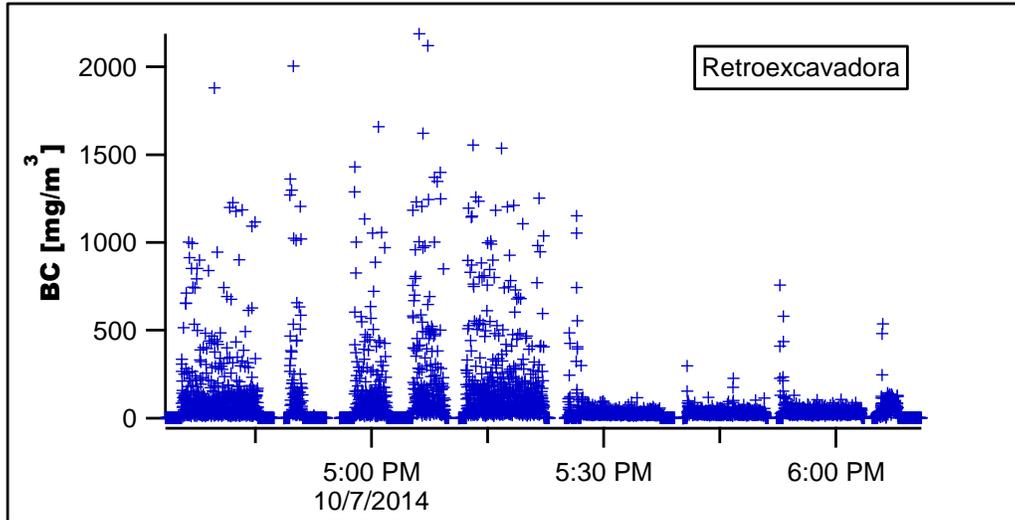


Figura A.1 Mediciones de línea base de carbono negro de retroexcavadora en Imán

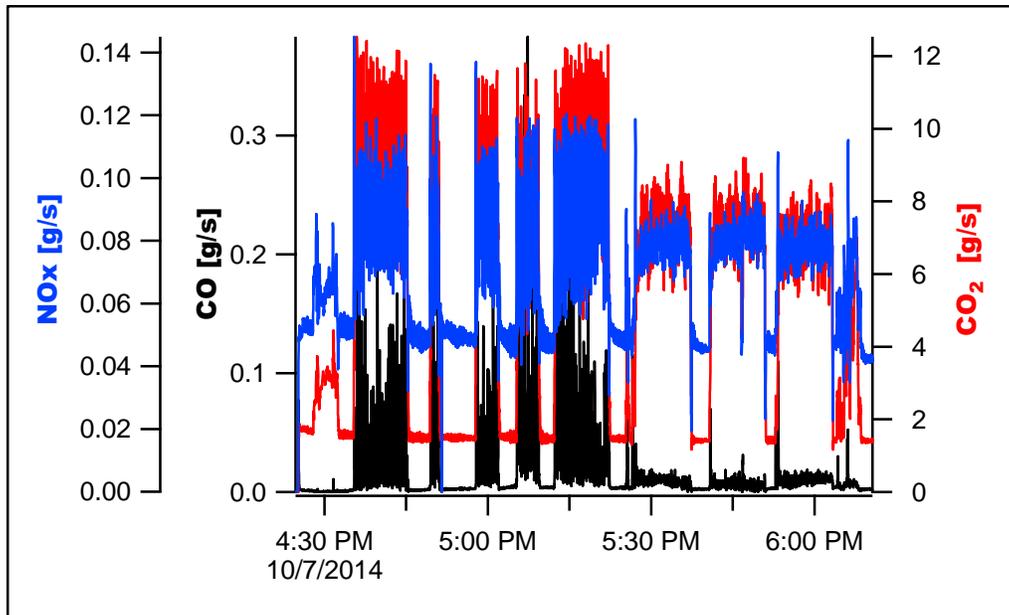
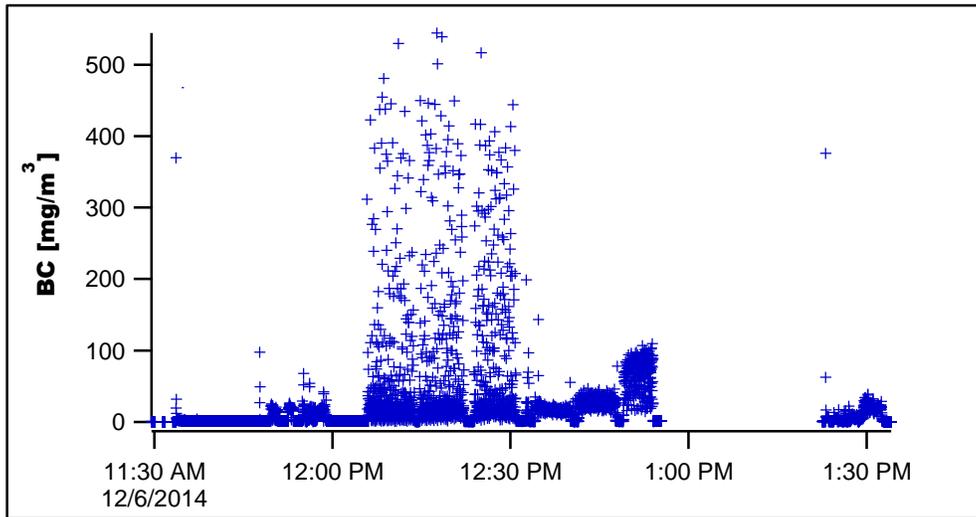


Figura A.2 Mediciones de línea base de CO, CO<sub>2</sub>, y NO<sub>x</sub> de retroexcavadora en Imán



**Figura A.3** Mediciones de con filtro de carbono negro de retroexcavadora en Imán

## Acrónimos

AMECO	American Equipment Company, Inc.
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen (Instituto de los motores de combustión interna)
AXION	PEMS marca registrada de GlobalMRV Inc.
CN	Carbono Negro
CARB	California Air Resources Board
CCA	Centro de Ciencias de la Atmosfera
CCAC	Climate and Clean Air Coalition (Coalición por el clima y el aire limpio)
CIMA	Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz
DCL	Diesel Control Limited (Control Limitado de Diesel)
DPF	Diesel Particle Filter (Filtro de Partículas de Diesel)
ECOSTAR	Marca Registrada de Sensors Inc.
GEF	Global Environmental Facility (Fondo Mundial para el Medio Ambiente)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
MCE2	Molina Center for Energy and the Environment
MLED	Mexico Low Emissions Development (Desarrollo en México Bajo en Emisiones)
MSS	Micro-Soot Sensor (Detector de hollín microscópico)
CO	Carbón Orgánico
OCIMA	Organismo de Certificación de Implementos y Maquinaria
PEMS	Portable Emissions Measurements System (Sistema Portátil de Medición de Emisiones)
PM	Material Particulado
RAVEM	Ride-Along Vehicle Emissions Measurement (Medición de las Emisiones en el Vehículo)
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEMTECH	Marca Registrada de Sensors Inc.
CCVC	Contaminantes Climáticos de Vida Corta
TEC	Tecnológico de Monterrey
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
VDEC	Verified Diesel Emissions Control (Control Verificado de las Emisiones de Diesel)
WMO	World Meteorological Organization (Organización Meteorológica Mundial)