

---

# MEDICIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES A VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO, EN EL CORREDOR INSURGENTES DE LA CIUDAD DE MÉXICO

INFORME FINAL

ENERO 2006

PROGRAMA DE INTRODUCCIÓN DE MEDIDAS  
AMBIENTALMENTE AMIGABLES EN TRANSPORTE  
EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

CONTRATO NO. GDF-SMA-GEF-SC-020-04

---



**AMBIENTALIS**  
CONSULTORÍA Y PROYECTOS DEL MEDIO AMBIENTE

---

---

# **MEDICIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES A VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO, EN EL CORREDOR INSURGENTES DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**INFORME FINAL  
ENERO 2006**

**Programa de Introducción  
de Medidas Ambientalmente Amigables en Transporte  
en la Zona Metropolitana del Valle de México**

**CONTRATO NO. GDF-SMA-GEF-SC-020-04**

Preparado por:

Christopher S. Weaver

**Engine, Fuel, and Emissions Engineering, Inc.**

3215 Luyung Drive

Rancho Cordova, CA, 95742 USA

Tel: (916) 368-4770

Marco V. Balam Almanza

**AMBIENTALIS**

Artemisa #95-9

Col. Nueva Santa María

México, D.F. 02800

Tel: 52 (55) 5556-1685

AMBIENTALIS es una subsidiaria de  
BALAM, GARCÍA Y ASOCIADOS, S.C.

## RESUMEN EJECUTIVO

*Engine, Fuel and Emissions Engineering, Inc. (EF&EE)* ha sido contratada por la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del Gobierno de la Ciudad de México, para llevar a cabo la medición de emisiones contaminantes de escape a vehículos de transporte público, operando en el corredor de la Avenida de Los Insurgentes, en la Ciudad de México. Este proyecto se ha llevado a cabo como parte del proyecto “Programa de Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables en Transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México”, el cual ha sido financiado por el *Global Environmental Fund* (GEF), y administrado por la Secretaría del Medio Ambiente y el Banco Mundial.

La Avenida de Los Insurgentes es una de las principales arterias que cruzan la Ciudad de México de norte a sur y diariamente experimenta elevada congestión vehicular, especialmente durante las horas pico. El servicio de transporte público se provee por la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo Metro, y por el nuevo sistema Metrobús de transporte rápido (*BRT – Bus Rapid Transit*), el cual recién inició su operación en junio del 2005. Hasta entonces, el servicio de transporte de pasajeros en la Avenida de los Insurgentes había sido proporcionado por la línea 2 de microbuses y la Red de Transporte de Pasajeros (RTP), ambos de los cuales han sido reubicados o eliminados de esa importante avenida.

Los objetivos principales del contrato con *EF&EE* fueron:

1. medir las emisiones contaminantes de una muestra de autobuses y microbuses, que anteriormente operaban en la Avenida de Los Insurgentes;
2. medir las emisiones de autobuses utilizados en la nueva línea de Metrobús; y
3. medir las emisiones de vehículos de tecnologías “limpias”, que en un futuro pudieran ser consideradas para su incorporación en el sistema de Metrobús, o en general en la flota de transporte público de la ciudad.

Las pruebas de emisiones fueron realizadas a bordo de 17 autobuses de reciente modelo, así como vehículos de demostración, así como en cuatro microbuses utilizando el Sistema Portátil de Medición de Emisiones Vehiculares, RAVEM (*ride-along vehicle emission measurement system*). Las pruebas de emisiones se llevaron a cabo en tres etapas, extendiéndose de noviembre de 2004 a octubre de 2005. No todos los vehículos estuvieron disponibles para pruebas en cada una de las etapas.

Los vehículos evaluados incluyeron doce vehículos convencionales a diesel, dos diesel-eléctricos híbridos y tres vehículos a gas natural comprimido (GNC) en motores *lean-burn*. Los cuatro microbuses incluyeron uno a gasolina en un motor estoquiométrico, uno retroadaptado a gas L.P., uno retroadaptado a GNC, y un vehículo dual retroadaptado a utilizar GNC o gasolina. Dos vehículos a diesel y uno híbrido fueron equipados con trampas de partículas (DPF – *diesel particle filters*). Todos los vehículos a GNC estuvieron equipados con convertidores catalíticos.

La ruta de prueba fue un viaje redondo sobre Insurgentes Norte, del paradero de Indios Verdes a la Glorieta de Insurgentes, y de vuelta. La distancia total de esta ruta es de 21.4 kilómetros. Las pruebas se llevaron a cabo en dos condiciones de manejo o rutas, correspondiendo la primera a la operación en tráfico normal durante el día –por la mañana–, y a la operación simulando el corredor del Metrobús, libre de tráfico. Los tiempos de prueba (incluyendo tiempo en ralentí al principio y al final de cada ruta fue de 4500 y 3600 segundo, respectivamente. Las velocidades promedio correspondientes fueron 17.1 y 21.4 kilómetros por hora.

Los contaminantes evaluados fueron partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y carbonilos como formaldehído y acetaldehído. También se evaluaron y especiaron compuestos orgánicos volátiles (COV) como metano, etano, etileno, etc, los cuales se evaluaron de manera exitosa en algunas pruebas.

La emisiones de partículas de todos los autobuses operados a GNC –incluidos el microbús dual y el operado con gas L.P., fueron extremadamente bajas, desde 0.01 a 0.04 gramos por kilómetro. Las emisiones de PM del microbús a gasolina fueron mucho más elevadas, de 0.16 a 0.22 gramos por kilómetro. El autobús híbrido a diesel, equipado con DPF, tuvo emisiones de PM similares a los vehículos a gas natural, emitiendo 0.03 gramos por kilómetro, mientras que los dos vehículos convencionales equipados con DPFs, exhibieron relativamente bajas emisiones de PM, de 0.01 a 0.08 gramos por kilómetro. Siete de los diez vehículos sin DPFs mostraron relativamente bajas emisiones, de 0.07 a 0.45 gramos por kilómetro (este último valor aplica al autobús articulado de 18 mts). Cuatro de estos autobuses con bajas emisiones, contaban con motores que fueron certificados al estándar US-EPA 1998, que es aún el límite para vehículos pesados nuevos en México. Uno de esos vehículos, estaba certificado al estándar US-EPA 2004, mientras que dos estaban certificados al estándar Euro 3, que es similar al estándar US-EPA 1998. Dos otros vehículos certificados al estándar Euro 3 exhibieron emisiones de PM mucho más elevadas, de 0.55 a 0.68, y 1.55 a 2.08 gramos por kilómetro, respectivamente, así como el vehículo Fénix rehabilitado, el cual estaba equipado con un antiguo motor modelo 1991. Las emisiones de PM registradas también mostraron una fuerte correlación con las mediciones de opacidad de humo, estas últimas medidas de acuerdo al procedimiento SAE-J1667.

Las emisiones de NO<sub>x</sub> de los vehículos evaluados estuvieron en un rango de 0.1 a 21.3 gramos por kilómetro. Los autobuses a gas natural, y los microbuses a combustible gaseosa, en general exhibieron las emisiones más bajas de NO<sub>x</sub>, mientras que el microbús a gasolina fue el que tuvo las emisiones más altas de NO<sub>x</sub>. Las emisiones más bajas de NO<sub>x</sub> fueron del microbús de combustible dual, en el modo a gasolina, aunque esas emisiones estuvieron aunadas a muy elevadas emisiones de CO.

Las emisiones de NO<sub>x</sub> variaron significativamente entre los autobuses a diesel. Los dos autobuses híbridos exhibieron la segunda más baja, y los más altos niveles de emisiones de NO<sub>x</sub> en este grupo. Basados en los estándares de emisión a los que fueron certificados, muchos de estos autobuses exhibieron relaciones de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> más elevadas de lo esperado. Las emisiones de NO<sub>x</sub> “*brake-specific*” de los vehículos a diesel fueron estimadas basados la relación NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>, y estuvieron en un rango de 2.1 a 12.1 gramos por BHP-hr. Varios motores de autobús, supuestamente certificados a estándares de emisión US-EPA 1998 ó 2004, exhibieron emisiones de NO<sub>x</sub> “*brake-specific*” de 30 a 80 por ciento más elevadas que esos estándares en condiciones de manejo en calle. Un autobús Euro 3, resultó con emisiones de NO<sub>x</sub> “*brake-specific*” más bajas de lo esperado, pero también exhibió las emisiones más elevadas de PM.

Esto sugiere que el tiempo de inyección de combustible de ese vehículo, pudiera haber estado desajustado.

Las emisiones de CO de los autobuses a diesel y gas natural (*lean-burn*), fueron extremadamente bajas, en un rango de debajo del nivel de detección de menos de seis gramos por kilómetro. En el caso de los microbuses a GNC y gas L.P., las emisiones de CO fueron moderadamente altas, de 30 a 40, y alrededor de 80 gramos por kilómetro, respectivamente. Las emisiones de CO para el microbús a gasolina y el microbús dual, en modo gasolina, fueron extremadamente elevadas, yendo de 147 a 362 gramos por kilómetro. Esto indicaría que la mezcla aire-combustible debió, en promedio, estar en niveles ricos de mezcla.

Los tres autobuses a GNC, equipados con motores *lean-burn*, emitieron de 5 a 52 gramos de metano por kilómetro, alrededor de 0.1 a 3.1 gramos de etano, y niveles más bajos de etileno y de otras especies más complejas de COV. En modo a GNC, el microbús dual emitió de 0.8 a 4.6 gramos por kilómetro de metano, 0.05 a 0.24 gramos de etano y pequeñas cantidades de más complejos HCNM. En modo gasolina sus emisiones de metano fueron alrededor de 80% más bajas, pero sus emisiones HCNM se incrementaron considerablemente, promediando de dos a 3.7 gramos por kilómetro. Las emisiones de COV de los autobuses a diesel fueron tan bajas que no se pudieron distinguir de forma segura de los niveles ambiente, o línea base.

El consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> de los vehículos a diesel variaron dependiendo del tamaño del vehículo, en un rango de alrededor de 200 gramos de combustible por kilómetro para el autobús ligero de 10 metros, a alrededor de 500 gramos por kilómetro para el autobús articulado de 18 metros. El consumo de masa de combustible para los vehículos a gas natural fue similar al consumo de los vehículos a diesel del mismo tamaño. Los microbuses a gas natural y a gas L.P. utilizaron alrededor de 2/3 partes del combustible utilizado por los autobuses a diesel y a gas natural. El consumo de masa de combustible para el microbús a gasolina fue sustancialmente mayor.

El consumo de combustible y emisiones de escape en condiciones de manejo regular fue en a veces mayor, a veces menor, que durante el manejo en condiciones de simulación del corredor, dependiendo esto del vehículo utilizado y su conductor. La ausencia de tráfico permitió que los conductores “agresivos” pudieran conducir más rápido y/o acelerar más intensamente, produciendo con ello un aumento en el consumo de combustible. Un análisis estadístico de los seis autobuses con los datos más completos mostró una reducción promedio del consumo de combustible, y emisiones de CO<sub>2</sub> del 10% en el caso de tres vehículos a diesel, cuando se les operó en condiciones simuladas del corredor, comparado con condiciones de manejo regular. En el caso de tres autobuses a gas natural, la reducción fue de 11%. Sin embargo, ninguno de estos valores es estadísticamente significativo en el nivel de 90%.

Ocho de los vehículos evaluados en este programa fueron también evaluados por el sistema de dinamómetro de chasis transportable, perteneciente a la *West Virginia University* (WVU). El ciclo MX3 de WVU, fue diseñado para simular la operación de un autobús en el corredor, de la misma manera que nuestra Ruta Corredor Insurgentes, en donde las velocidades promedio en ambos ciclos son similares. Sin embargo, el MX3 es más severo, con 50 paradas por hora comparado con 30 de la Ruta Corredor Insurgentes, lo que tendería a producir mayores emisiones por kilómetro. Ambos sets de mediciones muestran tendencias similares, pero los datos del RAVEM en el Corredor de Insurgentes muestra en promedio 1/3 más bajos que los resultados del MX3 del WVU.

Se realizaron también algunas pruebas a dos autobuses Mercedes Benz 1991, uno de los cuales fue repotenciado con un motor que cumple con los estándares de emisión mexicanos existentes. Las emisiones de PM, CO, y NO<sub>x</sub> del autobús repotenciado fueron 88%, 86%, y 59%, más bajos respectivamente, que los encontrados en el autobús que no fue repotenciado. Por lo tanto, la repotenciación con motores modernos, con controles de emisión, pueden lograr reducciones importantes. Dicha repotenciación es posible en autobuses con motor trasero, pues los que tienen el motor en la parte frontal generalmente carecen de suficiente espacio para acomodar los accesorios de los motores mencionados.

## CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO .....	i
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS DE PRUEBA Y RUTAS DE MANEJO .....	3
2.1 Vehículos de Prueba.....	3
2.2 Rutas de Manejo.....	3
2.2.1 Ruta de Manejo Insurgentes Norte.....	4
2.2.2 Ruta de Manejo Corredor Insurgentes .....	7
2.3 Conductores.....	8
3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA RAVEM .....	9
3.1 Principios de Operación .....	9
3.2 Subsistemas y Operación del RAVEM .....	11
3.2.1 Sistema de Dilución de Volumen Constante Miniatura .....	12
3.2.2 Sistema de Muestreo Proporcional Isokinético.....	12
3.2.3 Sistema de Bolsas de Muestreo .....	13
3.2.4 Sistema de Análisis de Gases .....	13
3.2.5 Sistema de Muestreo de Partículas.....	14
3.2.6 Sistema de Muestreo de Cartuchos DNPH .....	15
3.2.7 Sistema de Procesamiento y Manejo de Datos.....	15
3.2.8 Entradas Auxiliares .....	16
3.3 Medidas de Control de Calidad.....	16
3.4 Pruebas de Correlación.....	17
4. RESULTADOS DE EMISIONES DE MASA .....	20
4.1 PM, NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE .....	20
4.2 Efectos de Repotenciación a un Autobús Modelo 1991 .....	32
4.3 Carbonilos .....	33
4.4 Especiación de Emisiones COV .....	36
4.5 Comparación con datos de la Universidad de West Virginia.....	39

5.	MEDICIONES ADICIONALES: RUIDO Y OPACIDAD .....	42
5.1	Ruido .....	42
5.1.1	Procedimiento de Medición .....	42
5.1.2	Resultados .....	42
5.2	Opacidad de Humo de Escape.....	43
5.2.1	Procedimiento de Medición .....	43
5.2.2	Resultados .....	43
6.	CONCLUSIONES .....	45
7.	REFERENCIAS .....	48

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Traza típica de velocidad, en ruta de manejo <i>Insurgentes Norte</i> (fileMX0202, RTP 23-1003).....	7
Figura 2: Paradas en la ruta de manejo <i>Corredor Insurgentes Norte</i> (de Indios Verdes a Insurgentes, que incluye solo 30 paradas en el trayecto redondo sobre Insurgentes Norte). Fuente: Metrobús de la Cd. de México. ....	8
Figura 3: Diagrama esquemático del sistema RAVEM .....	10
Figura 4: Comparación de emisiones de PM de autobuses a diesel.....	24
Figura 5: Comparación de emisiones de PM de autobuses a gas natural y microbuses .....	24
Figura 6: Comparación de emisiones de NOx de autobuses a diesel.....	25
Figura 7: Comparación de emisiones de NOx de autobuses a gas natural y microbuses .....	25
Figura 8: Consumo de combustible de autobuses a diesel.....	26
Figura 9: Consumo de combustible de autobuses a gas natural y microbuses.....	27
Figura 10: Mediciones en el corredor de Insurgentes – RAVEM vs WVU MX3 .....	41
Figura 11: Emisiones de PM “ <i>Brake-specific</i> ” vs. opacidad de humo.....	44

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Vehículos Evaluados.....	4
Tabla 2: Trayecto de Glorieta Insurgentes a Indios Verdes, siguiendo un autobús de RTP.....	5
Tabla 3: Trayecto de Indios Verdes a Glorieta Insurgentes siguiendo a un autobús de RTP.....	6
Tabla 4: Resultados de recuperación de combustible del RAVEM.....	17
Tabla 5: Emisiones reguladas y eficiencia de autobuses a diesel.....	21
Tabla 6: Emisiones reguladas y eficiencia de autobuses a gas natural y microbuses.....	23
Tabla 7: Cambio de emisiones debido a la operación simulada del corredor Insurgentes.....	28
Tabla 8: Emisiones de autobuses a diesel en gramos por BHP-hr (estimadas).....	30
Tabla 9: Emisiones de autobuses a diesel por pasajero por kilómetro.....	31
Tabla 10: Emisiones de autobuses a gas natural y microbuses, por pasajero por kilómetro.....	32
Tabla 11: Emisiones y consumo de combustible del vehículo 1991 repotenciado y no repotenciado.....	33
Tabla 12: Emisiones de Carbonilos.....	34
Tabla 13: Emisiones de Carbonilos (continuación).....	35
Tabla 14: Especiación de emisiones de COV.....	36
Tabla 15: Especiación de emisiones de COV (continuación).....	37
Tabla 16: Especiación de emisiones de COV (conclusión).....	38
Tabla 17: Mediciones sobre el corredor de Insurgentes – RAVEM vs WVU MX3.....	40
Tabla 18: Resultados de Emisiones de Ruido.....	42
Tabla 19: Resultados de Mediciones de Opacidad con el procedimiento SAE J1667.....	44

# 1. INTRODUCCIÓN

*Engine, Fuel and Emissions Engineering, Inc. (EF&EE)* ha sido contratada por la Secretaría de Medio Ambiente (SMA) del Gobierno de la Ciudad de México para llevar a cabo mediciones de emisiones contaminantes a autobuses de transporte público operando en el corredor de la Avenida de los Insurgentes, en la Ciudad de México. Este esfuerzo se llevó a cabo como parte del “Programa de Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables en Transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México”, financiado por el *Global Environmental Fund*, y administradas por la SMA y el Banco Mundial.

La Avenida de los Insurgentes es una arteria principal que cruza la Ciudad de México de Norte a Sur. Diariamente, está sujeta a elevados niveles de tráfico y a congestión vehicular durante horas pico. El servicio de transporte público en el corredor de esta Avenida, se provee por la línea tres del sistema de transporte Metro y por la nueva línea BRT (Bus Rapid Transit) llamada “Metrobús”, que recién empezó sus operaciones en junio del 2005. Hasta entonces, el transporte público en la Avenida de los Insurgentes era proporcionado por autobuses y microbuses, los cuales han sido reubicados o eliminados.

Los objetivos principales del contrato con *EF&EE* fueron:

4. medir las emisiones contaminantes de una muestra de autobuses y microbuses, que anteriormente operaban en la Avenida de Los Insurgentes;
5. medir las emisiones de autobuses utilizados en la nueva línea de Metrobús; y
6. medir las emisiones de vehículos de tecnologías “limpias”, que en un futuro pudieran ser consideradas para su incorporación en el sistema de Metrobús, o en general en la flota de transporte público de la ciudad.

La medición de emisiones se llevó a cabo en tres etapas, o campañas, extendiéndose de noviembre del 2004 a octubre del 2005. No todos los autobuses estuvieron disponibles en cada etapa. Este informe final contiene los resultados de las tres campañas de mediciones.

Las emisiones de masa medidas en el escape, se llevaron a cabo utilizando la versión tres del sistema Portátil de Medición de Emisiones Vehiculares (RAVEM). Este sistema fue desarrollado por EF&EE, y el RAVEM con número de serie 002 fue comprado por la SMA, específicamente para su uso en este proyecto. Ésta fue la primera venta comercial de un sistema RAVEM.

El sistema RAVEM utiliza flujo proporcional de muestreo de volumen constante (CVS) para medir partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Para la caracterización de carbonilos y la especiación de COVs, se utilizaron cartuchos DNPH y bolsas con muestras integradas, respectivamente.

Durante la primer etapa de muestreo, se llevaron a cabo mediciones a 17 autobuses de año/modelo reciente y vehículos de demostración, así como a cuatro microbuses (vehículos para 23 pasajeros, con motor frontal, basados en chasis de una Van). Doce de los autobuses eran a diesel, dos híbridos diesel-eléctricos, y tres fueron a gas natural comprimido (GNC). Dos

autobuses a diesel y un híbrido diesel-eléctrico estaban equipados con trampas de partículas (DPF). Un microbús era a gasolina, y uno había sido retroadaptado a GNC, uno a gas L.P., y uno dual (GNC o gasolina). Todos los microbuses y todos los autobuses a GNC, estaban equipados con convertidores catalíticos. Cuatro de los autobuses a diesel (incluyendo los dos equipados con DPF) y tres de los microbuses eran propiedad de organizaciones de transporte público que daban servicio en el corredor de la Avenida de los Insurgentes, mientras que el resto eran unidades prototipo o de demostración, que fueron hechos disponibles al proyecto por sus fabricantes.

Las emisiones de escape fueron medidas mientras se operaba al vehículo en una de las dos rutas especificadas. Ambas rutas cruzaban el segmento norte de Avenida de los Insurgentes, entre el paradero de Indios Verdes y la Glorieta de los Insurgentes, en un trayecto redondo de 21 kilómetros. La ruta *Insurgentes Norte* era recorrida durante las horas pico de la mañana, y fue diseñada para reflejar la operación normal del transporte bajo condiciones antes de la apertura de la línea del Metrobús. La ruta *Corredor Insurgentes* fue diseñada para simular condiciones de tráfico esperadas dentro del carril confinado del Metrobús. Esta ruta tenía menos paradas y fue recorrida durante el periodo de las 2 a.m. a 6 a.m., con muy bajo tráfico.

También se llevaron a cabo mediciones limitadas a dos autobuses de RTP modelo 1991, uno de los cuales fue repotenciado con un motor que cumple con los estándares de emisión mexicanos actuales. Estas pruebas se llevaron a cabo en una ruta diferente, por lo que se reportan sus emisiones de manera separada.

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS DE PRUEBA Y RUTAS DE MANEJO

### 2.1 VEHÍCULOS DE PRUEBA

Se llevaron a cabo pruebas de emisiones a bordo de 17 autobuses y cuatro microbuses (ver Tabla 1). Los vehículos evaluados incluyeron 12 vehículos a diesel convencionales, dos autobuses híbridos (diesel-eléctricos), y tres autobuses a gas natural comprimido (GNC) en motores “lean-burn”. Todos los vehículos, excepto el Busscar, tenían transmisión automática. Dos vehículos diesel y un híbrido tenían instalados un DPF (trampa de partículas), de la marca Johnson-Matthey CRT™. Todos los vehículos a GNC estaban equipados con convertidores catalíticos de dos vías.

Los cuatro microbuses incluían uno a gasolina con motor estoquiométrico, uno retroadaptado a gas LP, uno retroadaptado a GNC, y un vehículo de combustible dual que podía operar con gasolina o GNC, y fue evaluado con cada uno de estos combustibles. Originalmente, los microbuses se encontraban equipados con convertidores catalíticos de tres vías, pero no se verificó que estos sistemas estuvieran intactos. Deduciendo de las emisiones presentadas por estos vehículos el convertido catalítico de tres vías del microbús a gasolina pudo haberse encontrado en muy malas condiciones.

Los dos autobuses Mercedes y los dos Internacional fueron tomados de la flota de la Red de Transporte de Pasajeros. Los tres metrobuses incluidos también estaban en servicio con la red Metrobús. Tres de los cuatro microbuses también estaban en tránsito regular, mientras que el microbús dual pertenecía a la firma ECOMEX. Los otros vehículos evaluados fueron facilitados por sus fabricantes para efectos de demostración.

Para efectos de prueba de emisiones, todos los vehículos fueron lastrados al 70% de su capacidad de pasajeros. Como lastre se utilizaron bridones de agua, simulando pasajeros.

### 2.2 RUTAS DE MANEJO

Las emisiones de escape se evaluaron en dos rutas de manejo reales que incluyeron la combinación de condiciones de paro-arranque y velocidad crucero, típicamente experimentadas por el transporte público en la Ciudad de México. Ambas rutas de manejo están localizadas a una altura aproximada de 2,250 metros sobre el nivel del mar y la presión barométrica típica de alrededor de 785 milibar (23% menos que al nivel del mar). A continuación sigue una descripción de ambas rutas.

**Tabla 1: Vehículos Evaluados**

Fabricante del Vehículo	Descripción/ Modelo	Identific.	Motor		Controles de Emisión	Combustible	Peso (kg)	
			Modelo	HP			Prueba	Bruto
<b>Autobuses a Diesel</b>								
Mercedes Benz	RTP No. 12-592	RTP 1	OM 906-LA	230	EPA 98	D50	12,020	14,000
International	RTP No. 23-995	RTP 2	DT466E	215	EPA 98	D350	13,994	15,800
Volvo	12 m	Vol 12	D7C	300	Euro 3	D15	14,131	16,000
Scania	18-m Articulado	Sc 18	DC9	300	Euro 3	D50	25,957	29,500
Mercedes Benz	10 m Boxer	MB 10	OM924-LA	NA	EPA 04	D15	NA	8,063
Mercedes Benz	11.4 m Torino	MB 11	OM924-LA	230	EPA 98	D15	NA	NA
Mercedes Benz	12.3 m Torino	MB 12	OM926-LA	280	EPA 98	D50	NA	NA
<b>Metrobuses a Diesel</b>								
Scania	18-m Articulado	RTP	DC9	300	EURO 3	D350	25,957	29,500
Volvo	18-m Articulado	CISA	DH12-340	340	EURO 3	D350	25,957	29,500
Fénix	18-m Articulado	Fénix	DDC	NA	NA	D350	NA	NA
<b>Autobuses a Diesel con Controles de Emisión Adicionales</b>								
Mercedes Benz	RTP No. 12-569	RTP3	OM 906-LA	230	EPA 98+ DPF	D50	12,020	14,000
International	RTP No. 23-1022	RTP4	DT466E	215	EPA 98+ DPF	D15	13,994	15,800
Gillig/Allison	"Magic Bus" híbrido	Allison	ISB	260	híbrido+ DPF	D15	13,646	15,890
Eletrabus	Híbrido	Eletrabús	OM 904-LA	150	híbrido+ Euro 2	D15	NA	NA
<b>Autobuses a Gas Natural Comprimido (GNC) con motor "lean-burn"</b>								
Busscar	Urbanuss Plus	Busscar	B5.9-230G	230	EPA 04 w CC2	CNG	N/A	15,760
FAW AMI	CA6160	FAW	C8.3G+	280	EPA 04 w CC2	CNG	13,706	15,500
Anhui Ankai	HFF6110GK5	Ankai	B5.9-230G	230	EPA 04 w CC2	CNG	14,350	16,000
<b>Microbuses con Motor a Gasolina (Retroadaptados a gas)</b>								
Chevrolet	Ruta 3 No. 030473	M-CNG	NA	NA	CC3	LPG	NA	NA
NA	Ruta 2 No. 1133	M-LPG	NA	NA	CC3	GNC	NA	NA
NA	Ruta 2 No. 21403	M-Gsln	NA	NA	CC3	Sin plomo	NA	NA
NA	Microbús de combustible dual	M-D-Gsln M-D-CNG	NA	NA	CC3	Sin plomo CNG	NA	NA

N.A.: No disponible;

D15: Diesel con 15 ppm contenido de azufre

D50: Diesel con 50 ppm contenido de azufre

D350: Diesel con 350 ppm contenido de azufre

CC3: Convertidor Catalítico de 3 Vías

GNC: Gas Natural Comprimido

LPG: Gas Licuado de Petróleo

Sin Plomo: Gasolina sin plomo

CC2: Convertidor Catalítico de 2 Vías

### 2.2.1 Ruta de Manejo Insurgentes Norte

Esta primer ruta de manejo se diseñó en una ruta predeterminada, en tráfico real, en condiciones normales de operación, que era atendida por autobuses de la Red de Transporte de Pasajeros (RTP), y microbuses de la *Ruta 2*. Por lo tanto, en esta ruta se evaluaron emisiones de escape reales. Para simular el peso de los pasajeros todos los vehículos se lastraron con contenedores de agua al 70% del peso de pasajeros. La ruta corría a lo largo de la Av. de los Insurgentes, una de las principales arterias de la Ciudad de México. La Av. de los Insurgentes se divide en Insurgentes Norte e Insurgentes Sur y corre a lo largo de la ciudad de Norte a Sur. Sin embargo, ya que la ruta es demasiado larga y el tráfico es altamente variable, la ruta de prueba se limitó al segmento de Insurgentes Norte. Este segmento corre de Indios Verdes (al norte de la ciudad) a la glorieta de los Insurgentes (cerca del Centro), y viceversa. Este segmento varia muy poco en

altitud de punto a punto. El viaje redondo dura aproximadamente 4,500 segundos (1 hora y 15 minutos) incluyendo paradas. La Tabla 2 y Tabla 3 muestran las paradas a lo largo de esta ruta.

La Tabla 2 y Tabla 3 también muestran tres viajes redondos sobre la Ruta Insurgentes Norte (partiendo de la Glorieta de Insurgentes a Indios Verdes) realizados el viernes 24 de junio del 2004. Estos viajes empezaron a las 9:10am, 10:30am, y 12:26pm, de estos viajes se concluyó que la parada promedio fue de alrededor 35 segundos. Esta información fue confirmada más tarde por RTP. Los viajes fueron llevados a cabo por Enrique Rivero Borrell del Gobierno de la Ciudad de México y Marco Balam de Ambientalis.

La Ruta Insurgentes Norte se compone de dos secciones relativamente bien definidas: una sección rápida donde las velocidades pueden alcanzar los 65 kilómetros por hora, y una sección comercial más lenta, donde las velocidades son de alrededor de 17 kilómetros por hora. Se estima que estas condiciones replican las rutas de autobuses de pasajeros en la Ciudad de México.

**Tabla 2: Trayecto de Glorieta Insurgentes a Indios Verdes, siguiendo un autobús de RTP.**

INICIO	9:10AM	10:30AM	12:26PM
<b>De Glorieta Insurgentes a Indios Verdes</b>	<b>Tiempo Acumulado</b>		
<b>Sección Comercial</b>	Min Seg	Min Seg	Min Seg
G. Insurgentes	0 0	0 0	0 0
Londres	2 2	1 12	- -
Hamburgo (Oxxo)	2 40	1 40	- -
Reforma (VIPS)	3 50	2 58	2 20
Sullivan II	5 38	4 57	4 6
Antonio Caso	6 13	6 1	5 16
Edison (Dormimundo)	8 5	- -	- -
Pte. de Alvarado	9 3	7 22	7 26
H. Ferrocarrileros	9 50	- -	- -
Colosio (PRI)	11 2	- -	- -
Mosqueta	11 21	9 20	9 39
<b>Sección Rápida</b>			
Díaz Mirón (Buenavista)	- -	- -	10 54
Eligio Ancona	- -	11 20	- -
M. González (Eje 2 Nte)	13 0	12 18	12 32
San Simón I	- -	- -	- -
Monum. a la Raza	- -	- -	- -
Gas PEMEX	- -	14 52	- -
Metro la Raza	15 44	- -	15 15
Eúzcaro	18 50	17 0	- -
Montevideo	- -	18 12	18 19
Indios Verdes	<b>20 38</b>	<b>20 06</b>	<b>20 08</b>

Nota: Una línea (-) significa que el autobús no requirió hacer parada por pasajeros.

La Tabla 2 muestra que el tiempo de ruta fue muy consistente durante este día, alrededor de 20 a 21 minutos de Glorieta de Insurgentes a Indios Verdes, haciéndola muy conveniente para la medición de emisiones de escape.

**Tabla 3: Trayecto de Indios Verdes a Glorieta Insurgentes siguiendo a un autobús de RTP.**

De Indios Verdes a Glorieta Insurgentes	Tiempo Acumulado					
	Sección Rápida		Min Seg		Min Seg	
Paradero Indios Verdes	0	0	0	7	0	0
Metro La Raza	3	55	3		3	25
San Simón	-	-	-	-	-	-
Eulalia Guzmán (Eje 2 Nte)	6	15	5	15	5	43
M. Carpio	-	-	7	23	7	45
Alzate	10	20	8	53	10	10
<b>Sección Comercial</b>						
Sor Juana Inés (VIPS)	-	-	10	18	15	6
Amado Nervo (PRI)	-	-	-	-	19	0
San Cosme	14	30	16	48	23	0
Gómez Farías	20	39	21	26	30	0
Antonio Caso	23	30	24	40	32	7
Sullivan	25	30	27	18	-	-
Villalongín (Reforma)	-	-	29	0	-	-
Nápoles	28	52	31	16	38	16
Niza	-	-	33	6	39	58
Glorieta de Insurgentes	<b>31</b>	<b>05</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>29</b>
Indios Verdes	<b>20</b>	<b>38</b>	<b>20</b>	<b>06</b>	<b>20</b>	<b>08</b>

Nota: Una línea (-) significa que el autobús no requirió hacer parada por pasajeros.

Sin embargo, la Tabla 3 muestra mayor variabilidad en la ruta de regreso de Indios Verdes a la Glorieta de Insurgentes, donde cada viaje duró de 31 a 42 minutos.

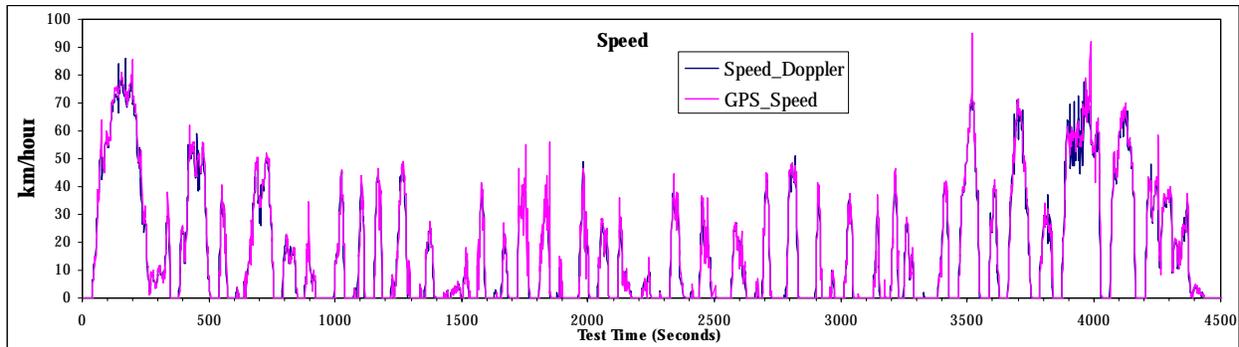
Por lo tanto, se midieron emisiones de escape en la Ruta Insurgentes Norte, donde cada prueba duró 4,500 segundos (75 minutos). Una prueba de esta duración eliminaría la variabilidad debido a ciclos individuales. Si cualquiera de las pruebas hubiera durado menos de 4,500 segundos, entonces el autobús permanecería en ralentí hasta que los 4,500 segundos hubiesen transcurrido. Si por el contrario, el viaje fuera mayor a 4,500 segundos, entonces la prueba de emisiones terminaría al completarse los 4,500 segundos. La diferencia en cualquier caso resultaría en que el autobús estuviera en ralentí debido al tráfico.

La distancia total de esta ruta fue en promedio 21.4 kilómetros y las paradas se muestran en la Tabla 2 y Tabla 3.

La Figura 1 muestra la variación de velocidad típica de un autobús en la Ruta de Insurgentes Norte. Como se muestra, los resultados del sensor Doppler y del sistema GPS son muy cercanos. Sin embargo, la traza de velocidad del GPS muestra incrementos repentinos ocasionales que no son físicamente posibles. Se pueden apreciar dos de estos incrementos repentinos en la Figura 1 alrededor de 3,500 y 4,000 segundos. Es probable que estos sean debido a la señal reflejada del GPS en edificios y otros vehículos en la ruta. Para eliminar estos incrementos repentinos se diseñó e implementó un algoritmo en el software de procesamiento de datos del RAVEM.

Las mediciones de emisiones en esta ruta se llevaron a cabo durante la mañana y tarde, entre las 9:00am y las 2pm, de lunes a sábado, ya que durante esas horas las condiciones de tráfico no

variaban de manera significativa. Después de las 2:00pm las horas pico hacían que la duración del viaje redondo variara de manera importante.



**Figura 1: Traza típica de velocidad, en ruta de manejo *Insurgentes Norte* (fileMX0202, RTP 23-1003).**

Durante el periodo de prueba, las condiciones de tráfico sobre Avenida de los Insurgentes cambió considerablemente debido a la construcción y puesta en marcha del sistema de transporte rápido Metrobús. Como parte de estos cambios, la operación de autobuses y microbuses se hizo prohibida (excepto por los vehículos pertenecientes al sistema Metrobús), y los carriles que anteriormente utilizaban los autobuses y microbuses para realizar paradas fueron dedicados a vehículos de pasajeros. Con este cambio de patrones de tráfico, las mediciones sobre Insurgentes Norte hubieran creado problemas viales, por lo tanto esta ruta ya no fue utilizada durante la segunda y tercera campañas de medición de emisiones.

### 2.2.2 Ruta de Manejo Corredor Insurgentes

Esta ruta fue similar a la Ruta Insurgentes Norte, excepto que las mediciones se llevaron a cabo durante la noche (entre 2:00am y las 6:00am) para simular el manejo a lo largo del carril confinado recientemente construido para el sistema Metrobús. También, las paradas fueron diferentes de la Ruta Insurgentes Norte. Las paradas para esta ruta fueron idénticas a las utilizadas por el sistema Metrobús (ver Figura 2).

Es importante mencionar que la operación del llamado “corredor” (carril confinado reservado al Metrobús) tuvo que ser simulado, ya que su construcción no fue terminada sino hasta junio del 2005. Inclusive después cualquier autobús que no perteneciera al Sistema Metrobús no tenía permitido operar en este carril, así que las pruebas a los autobuses restantes dentro de este programa tuvieron que realizarse durante la noche, y fuera del carril único. Sin embargo, las pruebas de emisiones a los tres metrobuses se llevaron a cabo dentro del carril confinado, durante las horas pico de la mañana, con bridones de agua como lastre en vez de pasajeros.

En la Ruta Insurgentes Norte, la duración de la prueba se redujo de 4,500 a 3,600 segundos. Con la construcción del carril confinado los efectos de la congestión de tráfico se redujeron considerablemente. Adicionalmente, también había menos paradas, por lo que el tiempo total de tránsito se redujo.

Tal como en la otra ruta, todos los vehículos evaluados en la Ruta Corredor de Insurgentes, se lastraron con bridones de agua para simular el 70% de carga de pasajeros.



**Figura 2: Paradas en la ruta de manejo *Corredor Insurgentes Norte* (de Indios Verdes a Insurgentes, que incluye solo 30 paradas en el trayecto redondo sobre Insurgentes Norte). Fuente: Metrobús de la Cd. de México.**

### 2.3 CONDUCTORES

Los hábitos de manejo tienen un impacto sustancial en las emisiones de escape. Por lo tanto se solicitó un solo conductor para todas las pruebas. Sin embargo, esto no fue posible debido a restricciones de horario y logística.

Con respecto al entrenamiento de los conductores para manejo adecuado, solamente se les indicó manejar de manera normal. Al principio de las pruebas los conductores lo hacían un poco nerviosos. Sin embargo, después del primer viaje redondo de la ruta respectiva, los operadores empezaron a manejar de manera más normal.

Con la entrada en operación del Sistema Metrobús, las condiciones de tráfico en la Ruta Corredor Insurgentes se mejoraron significativamente durante la segunda y especialmente la tercera campaña de medición de emisiones. Los conductores tendían a manejar a la velocidad de los metrobuses, en vez de manejar tan rápido como fuera posible entre paradas, tal como lo hicieron durante la primera campaña de mediciones. El tráfico mejoró y se redujeron las velocidades máximas, lo que resultó en menores emisiones y consumo de combustible durante esas últimas campañas de muestreo.

### 3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA RAVEM

Las mediciones de emisiones se llevaron a cabo utilizando el Sistema Abordo de Medición de Emisiones Portátil (RAVEM), con número de serio 002. El sistema fue adquirido por la Secretaría del Medio Ambiente, específicamente para este proyecto. La tecnología RAVEM fue desarrollada y patentada por EF&EE, Inc. El sistema RAVEM fue uno de los primeros PEMS (*portable emission measurement systems*) desarrollados y actualmente es el único PEMS comercialmente disponible con la capacidad de medir emisiones de partículas, así como de NO<sub>x</sub>, CO, y CO<sub>2</sub>. Sus opciones –empleadas en este estudio–, permiten la medición y cuantificación de especies individual de compuestos orgánicos volátiles (COVs), y carbonilos como formaldehído, acetaldehído, y acroleína.

Durante los últimos cuatro años, EF&EE ha utilizado su propio prototipo del RAVEM para medir emisiones contaminantes de una amplia variedad de fuentes móviles, yendo camiones de basura<sup>1</sup> a ferries a diesel<sup>2</sup>. También ha utilizado la evaluación de sistemas de control de emisiones, incluyendo sistemas SCR (*selective catalytic reduction*), trampas de partículas (DPF), catalizadores de oxidación para diesel (DOC) y combustibles de emulsión.

#### 3.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

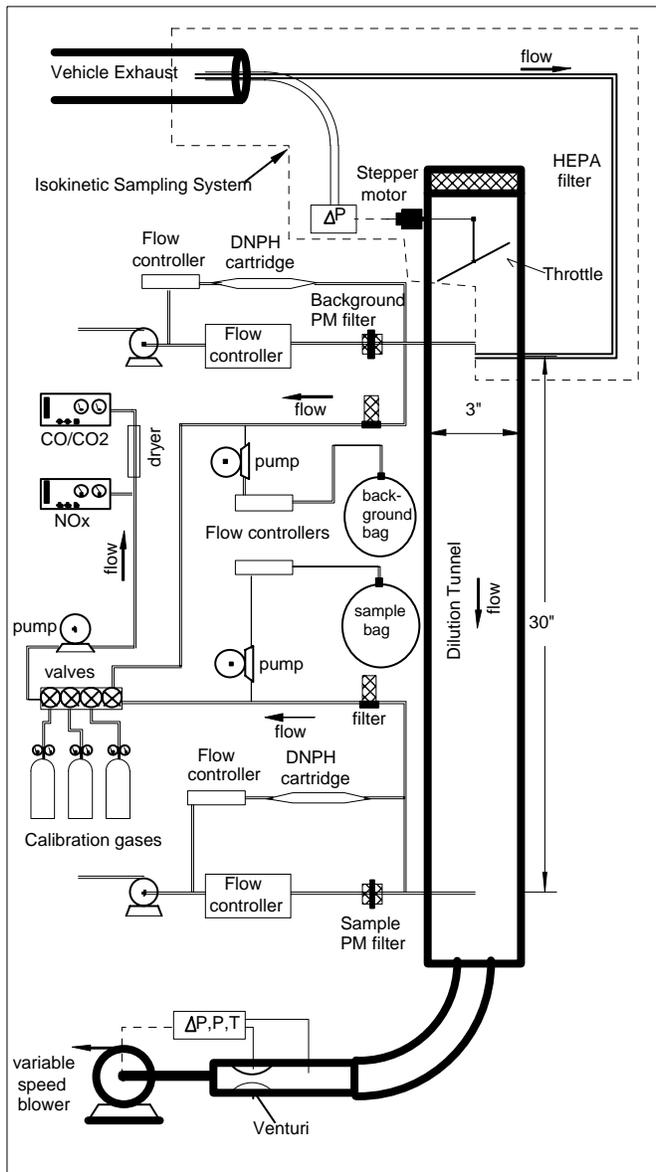
El sistema RAVEM se describe en dos artículos publicados<sup>3,4</sup>, así que sus principios de operación solo se resumen aquí. Como la referencia 3 lo explica con mayor detalle, el sistema RAVEM se basa en el flujo constante parcial y proporcional de muestreo constante de volumen (CVS – *constant volume sampling*), del escape del vehículo. El principio del CVS es ampliamente reconocido y utilizado para la medición de emisiones de vehículos debido a que la dilución de aire y la disposición de flujo total son tales, que la concentración del contaminante en el túnel de dilución es proporcional al flujo de masa del contaminante en el escape del vehículo. Las concentraciones gaseosas de contaminantes pueden entonces ser medidas directamente, así como concentraciones de partículas integradas. Por el otro lado, tasas de flujo de masa del escape pueden ser difícilmente medidas (además de lo costoso) debido a las condiciones dinámicas presentes.

Las emisiones totales en un ciclo de manejo determinado, tal como el Procedimiento Federal de Prueba de la US-EPA, o el México City Bus Cycle, son igual a la integración de flujo de masa de contaminante por el ciclo evaluado. En un sistema CVS, este valor integrado puede ser fácilmente determinado al integrar la concentración de la medición. El flujo del CVS entra a la ecuación como múltiplo constante y la integración de la concentración de masa puede ser lograda de manera numérica o física. La tasa de flujo de masa no entra dentro del cálculo, por lo que no es necesario medirla.

Para los gases, el sistema RAVEM utiliza integración numérica y física. Las concentraciones de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y CO en es gas de escape diluido, son grabados segundo a segundo durante cada prueba. Adicionalmente, la integración de las muestras del escape diluido se lleva a cabo recolectándolo en bolsas Tedlar®, y analizadas posteriormente para la evaluación de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y CO, y de manera opcional para otros contaminantes.

El muestreo de CVS en el caso de partículas, la integración se lleva a cabo de manera física –al pasar la muestra diluida a través de un filtro prepesado, a una tasa de flujo controlada y constante.

La masa adicionada al filtro se divide entre el volumen de la muestra pasada a través de ese filtro, donde el resultado es la emisión de masa promedio en ese ciclo de manejo.



La Figura 3 muestra al sistema RAVEM. Excepto por sistema de muestreo isocinético mostrada en la parte superior, este diagrama es similar a un sistema de dilución simple convencional de un sistema de medición con CVS:

Los métodos convencionales de medición de emisiones definidos por la U.S. EPA<sup>5</sup>, la el California ARB<sup>6</sup> (*Air Resources Board*), utilizan un CVS donde el flujo completo se extrae y diluye con aire ambiental.

El principio de muestre del RAVEM es como sigue: el RAVEM extrae y diluye de manera constante solo una pequeña fracción del total del flujo de escape. Por tanto la dilución, así como el tamaño del túnel de dilución puede ser reducida a niveles compatibles con la operación portátil del sistema. Como se explica en la sección 3.2.2, el sistema de muestreo isocinético proporcional (patentado<sup>7</sup>) continuamente ajusta el flujo de la muestra, de manera que la velocidad de flujo dentro de la punta de prueba es igual a la velocidad del escape a su alrededor. Ya que las velocidades son iguales (“isoquinéticas”), la tasa de flujos en el escape y la punta de muestra son igual a la tasa de los diámetros de las áreas de muestra.

**Figura 3: Diagrama esquemático del sistema RAVEM**

La concentración de contaminantes en el RAVEM sigue los métodos especificados en los estándares U.S. EPA (US CFR Vol 40 Part 86) y el estándar ISO 8178. Los contaminantes medidos son:

- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), mediante análisis de quemí-luminiscencia de muestra de escape diluido,
- Monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), mediante análisis infrarrojo no dispersivo de muestra de escape de-humidificada,
- Partículas (PM) mediante su recolección en filtros prepesados de Teflón, recubiertos con fibra de vidrio de borosilicato, seguidos de un post-condicionamiento y repesado de los filtros,
- Compuestos orgánicos volátiles (COV) mediante análisis de cromatografía de gases (CG) de muestras integradas en bolsas, utilizando detectores de ionización de flama, en un método similar al los métodos 102 y 103 del *California Air Resources Board*.
- Aldehídos y carbonilos, mediante su colección en cartuchos de gel de silicio, recubiertos de di-nitro fenil hidracina (*di-nitro phenyl hydrazine DNPH*), seguido de elusión con acetonitrilo y análisis de la muestra con cromatografía de líquidos de alta presión, tal como se especifica en el método US EPA TO11a.

La medición de aldehídos y análisis de CG para la caracterización de las emisiones de COV no fueron utilizadas en la primer parte de este programa, ya que estas opciones fueron solicitadas después de la entrega del sistema RAVEM básico, y no estuvieron disponibles al principio del programa.

### 3.2 SUBSISTEMAS Y OPERACIÓN DEL RAVEM

El sistema RAVEM se compone de los siguientes subsistemas clave:

- Sistema de dilución de volumen constante miniatura
- Sistema de muestreo proporcional isokinético
- Sistema de bolsas de muestreo: a) muestra de escape; b) aire del ambiente (background)
- Sistema de análisis de gases: a) CO/CO<sub>2</sub>; b) NO<sub>x</sub>
- Sistema de muestreo de partículas
- Sistema de muestreo con cartuchos DNPH
- Sistema de manejo y procesamiento de datos
- Entradas auxiliares

Cada uno de estos subsistemas se explica brevemente a continuación.

### 3.2.1 Sistema de Dilución de Volumen Constante Miniatura

Este es el corazón del sistema RAVEM. Como se muestra en la Figura 3, el motor de velocidad variable toma una muestra diluida de aire/escape del túnel de dilución, a un ritmo constante (expresada en litros estándar por minuto). El flujo de muestra es controlado por un sistema cerrado que mide el volumen de flujo vía un venturi. Se corrige la medición a las condiciones estándar de una atmósfera y 20 °C, y luego ajusta la velocidad del motor para permanecer justo en ese flujo. El venturi se calibra contra un flujómetro “hot-wire” de alta precisión (no se muestra) para compensar en caso de cualquier desliz del punto de calibración. Para lo anterior se requiere de una alta precisión, pues cualquier error en el flujo de masa resultaría en un error proporcional en los resultados finales.

El gas de escape crudo entra el túnel de dilución en la parte superior, donde se mezcla con aire de dilución pre-filtrado. Las proporciones de gas de escape y aire de dilución se controlan mediante el sistema de muestreo isokinético, por medio de una “mariposa” en la entrada de aire.

### 3.2.2 Sistema de Muestreo Proporcional Isokinético

El sistema de muestreo isokinético se compone de a) punta de prueba dentro del escape del vehículo; b) una línea de muestreo aislada que conecta la punta de prueba de gas crudo al túnel de dilución; y c) un sistema para controlar el flujo, manteniendo condiciones isoquinéticas. El sistema de control utiliza orificios detectores de presión estática, dentro y fuera de la punta de prueba, conectadas a un sensor de presión diferencial. Cuando este sensor lee cero, la presión dentro y fuera de la punta de prueba son iguales. Por tanto, el gas de escape entrando la punta de muestreo es igual en velocidad a la velocidad de escape fuera del tubo de escape ( $v_1 = v_2$ ).

La mariposa flujo arriba se conecta a una combinación motor/controlador “inteligentes”. El controlador responde a la señal del sensor de presión diferencial, cambiando la posición de la mariposa para mantener condiciones isoquinéticas. Cuando el flujo de escape se incrementa, el controlador cierra la mariposa, de tal manera que incrementa la caída de presión entre la punta de muestreo y el túnel de dilución, y así incrementando la velocidad de flujo a través de la punta de prueba. Cuando el flujo de escape se reduce, la mariposa se abre, reduciendo así la caída de presión y la velocidad de flujo dentro de la punta de prueba. Un ventilador flujo arriba de la mariposa (no se muestra) extiende el rango de dilución posible dentro del túnel a valores de presión ligeramente positivos, así como negativos (comparadas con la presión atmosférica ambiental).

Ya que el sistema de control depende de la igualación de presiones estáticas, medidas dentro y fuera de la punta de prueba, fugas y otros problemas en los orificios de presión, líneas de presión, o el sensor de presión diferencial pueden afectar las diferencias de presión medidas, y por ende los resultados de emisiones. Este fue un problema significativo durante la primera campaña de muestreo. La necesidad de fortalecer los procedimientos de control de calidad en esta áreas fue una de de las experiencias clave aprendidas en este proyecto. Para ayudar en la detección de este problema, EF&EE desarrolló y adaptó un cambio en el diseño para permitir el chequeo de las líneas de presión diferencial *in situ*. Esta modificación se instaló en el RAVEM de la Ciudad de México al principio de septiembre de 2005.

### 3.2.3 Sistema de Bolsas de Muestreo

El sistema de bolsas está diseñado para llenar un par de bolsas de Tedlar para cada prueba. Una bolsa contiene una muestra integrada de gas de escape diluido, proveniente del túnel de dilución, mientras que la otra bolsa contiene una muestra integrada de aire ambiental de dilución. Existen dos opciones respecto de las bolsas de Tedlar: un par de bolsas internas con volumen de cerca de 10 litros, o un par de bolsas externas con capacidad de 60 litros, alimentadas con dos conectores rápidos a puertos en el exterior del RAVEM. El sistema está diseñado para permitir que las bolsas externas puedan ser cambiadas entre pruebas, para que así se puedan analizar muestras de cada prueba en caso necesario, por ejemplo, por cromatografía de gases. La selección de bolsas internas o externas se realiza con un par de válvulas manuales de tres vías.

Para cada bolsa se extrae una muestra del puerto de muestra del túnel de dilución, por medio de una pequeña bomba y un filtro. Luego pasa a través de un controlador de flujo de masa a la válvula selectora de bolsa, y luego a la bolsa. La tasa de flujo a la bolsa tiene un rango típico de 0.25 a 1.5 litros estándar por minuto, y se mantiene constante durante la prueba de medición de emisiones. El flujo se calcula primero y se coloca de manera automática para capturar el volumen especificado durante la prueba, pero también puede ser colocado de manera manual por el operador. El flujo del volumen a la bolsa de muestra se suma al total del flujo del CVS al calcular los resultados de emisiones.

Cualquier fuga en la bolsa de muestra afectará directamente los resultados de emisiones de bolsa. Un test de fuga, por lo tanto, se lleva a cabo durante el proceso de vaciado de cada bolsa, antes de iniciar cualquier prueba.

Durante este programa de pruebas, se encontró que los controladores de flujo de masa a las bolsas ocasionalmente fallaban durante pruebas largas, haciendo que las bolsas se sobrellenaran y reventaran. La causa de este problema aún no ha sido identificada, pero se hicieron cambios en el software que permiten monitorear la contrapresión en las líneas de alimentación a las bolsas, lo que ha permitido detectar y corregir el problema.

### 3.2.4 Sistema de Análisis de Gases

El sistema de analizadores de gases se compone de una bomba de muestra, múltiple de válvulas, y analizadores de gases grado laboratorio: analizador NO<sub>x</sub> con control de temperatura, y analizador CO/CO<sub>2</sub> de temperatura ambiente, ambos instalados en una caja protectora de 19 pulgadas. Ambos analizadores cumplen con los estándares de rendimiento dictados por la US-EPA para analizadores de laboratorios de emisiones, listados en 40 CFR 86. El analizador de NO<sub>x</sub> es un *California Analytical Instruments HCLD 400*, equipado con un convertidor de NO a NO<sub>2</sub>, utilizando carbón activado. El analizador se mantiene a 60 °C, haciendo innecesario secar la muestra para evitar la condensación. El aire seco de baja presión para el ozonador se suministra vía una bomba adjunta, que primero pasa la muestra a través de un filtro y un cartucho desecante.

El analizador CO/CO<sub>2</sub> es un *California Analytical Instruments* modelo ZRH, que utiliza análisis infrarrojo no dispersivo (NDIR). El vapor de agua interfiere con la medición de NDIR, especialmente en el caso del CO, por lo que debe ser removido de la muestra. Esto se logra al pasar la muestra a través de una membrana intercambiadora de masa, de Teflón™ semi-

permeable. El gas seco, por otro lado, se suministra vía una pequeña bomba circulando aire a través del cartucho desecante.

El múltiple de válvulas del sistema de análisis de gases permite que la muestra sea alimentada de cualquiera de las siguientes fuentes: del gas diluido del túnel de dilución, del aire de dilución que entra al túnel (en el caso de mediciones de aire ambiental), de la bolsa integrada de muestra, de la bolsa integrada de aire ambiental, gas zero, gas span CO/CO<sub>2</sub>, o bien del gas span NO<sub>x</sub>. Estos tres últimos gases se utilizan para la calibración de los analizadores y están disponibles vía conectores rápidos en la parte exterior del sistema RAVEM. Los gases están certificados por el fabricante, y son trazables a estándares US NIST.

Durante una prueba de emisiones se monitorea de manera continua y se graba segundo a segundo, la concentración de gases en el gas de escape diluido. Cuando la prueba termina, los analizadores se calibran de manera normal nuevamente antes de analizar las concentraciones en las bolsas de muestra y aire ambiental.

Ya que las lecturas segundo a segundo pueden ser afectadas por variaciones de los analizadores, vibración, así como cambios de concentración de aire ambiente por donde pasa el vehículo evaluado, la bolsa de muestra diluida es generalmente más precisa, y por ende los resultados reportados generalmente corresponden a esta. Los datos segundo a segundo son de gran ayuda para examinar la variación en emisiones a lo largo del ciclo de manejo, y proveen también datos de utilidad al examinar la variación de emisiones en el ciclo de manejo, así como representan un respaldo en caso de que los datos de la bolsa de muestra pudieran perderse, por ejemplo, por una falla durante la prueba.

### 3.2.5 Sistema de Muestreo de Partículas

El sistema de muestreo de partículas está compuesto por una bomba de vacío, dos controladores de flujo y dos válvulas *shutoff*, dos portafiltros (uno para la muestra y una para el aire ambiente o *background*). Cada portafiltro contiene dos filtros en serie de 37 mm. Los filtros están fabricados de Teflón con recubrimiento de borosilicato y cumplen con las especificaciones de los estándares US-EPA (40 CFR 86.1311-90) y el ISO 8178, para la medición de PM de diesel. Al menos dos portafiltros son utilizados en cada prueba, y han sido diseñados para conectarse de manera rápida al sistema de muestreo, permitiendo que una prueba se esté llevando a cabo mientras se preparan los portafiltros para la siguiente prueba.

Durante una prueba de emisiones, las válvulas *shutoff* se abren, mientras que el gas de escape diluido y el aire de dilución son llevados a los filtros respectivos. El gas filtrado pasa luego a través de los controladores de flujo a la bomba de vacío, de donde se elimina al ambiente. Los controladores de flujo mantienen un flujo constante (típicamente de 10 a 30 litros estándar por minuto, dependiendo de la carga anticipada de PM) durante toda la prueba. El volumen del flujo es integrado y registrado durante la prueba para calcular la concentración de la masa de PM en la muestra diluida de aire/escape, así como en la muestra de aire ambiental.

Los controladores de flujo de masa fueron calibrados por el fabricante antes de su instalación al RAVEM. Se recomienda su recalibración anual, aunque dicha calibración no fue necesaria durante este programa, pues solo duró un año. Los controladores de flujo de masa fueron revisados en varias ocasiones contra un flujómetro de masa térmico *Sierra Instruments*, y se encontraron en cercana correlación.

El filtro expuesto al aire de dilución (aire ambiente o *background*) provee una “muestra blanca” de cada prueba realizada, y permite corregir los efectos de cambio de humedad, presión atmosférica, o PM proveniente del ambiente (incluyendo las especies condensables) presentes en el aire de dilución filtrado. La experiencia muestra que dichas correcciones pueden ser de hasta 0.01 a 0.02 gramos de PM por BHP-hr. Esto es importante pues esta cantidad de PM es de la misma magnitud que las emisiones de PM totales medidas en vehículos equipados con DPF en este estudio.

### 3.2.6 Sistema de Muestreo de Cartuchos DNPH

El sistema de muestreo de cartuchos DNPH es similar en su diseño al sistema de muestreo de PM descrito arriba, componiéndose de dos válvulas *shutoff*, dos portacartuchos para tubos de muestre de vidrio SKC de 6 mm, y dos flujómetros. Inicialmente el sistema incluía solo una bomba, pero más tarde se le asignó una bomba a cada flujómetro. El sistema de muestreo de cartuchos DNPH difiere del sistema de colección de PM en que usa flujos mucho más bajos (es decir, de 0 a 2 litros por minuto, en vez de 0 a 30), y en el hecho de que su flujo de entrada proviene directamente del sistema de abastecimiento a las bolsas de Tedlar, en vez de provenir directamente del túnel de dilución.

Para medir la concentración de carbonilos como el formaldehído, acetaldehído y acetona, el muestreador de cartuchos se carga con los tubos impregnados de gel de sílica DNPH de 6 mm. Se hace pasar muestra gaseosa de escape y de aire ambiental a través de filtros, y luego a través de los cartuchos, donde cualquier carbonilo presente reacciona con el DNPH y es retenido dentro del cartucho. Al finalizar la prueba los cartuchos son removidos y colocados en un *cooler* a una temperatura de 4 °C, transportado al laboratorio, y mantenidos en un refrigerador hasta que se lleve a cabo el análisis de cromatografía líquida (HPLC).

El análisis se realiza por HPLC isocrático, tal como lo especifica la EPA en el método TO11a para formaldehído. Este método también puede separar e identificar la mayoría de los otros carbonilos con hasta cuatro carbonos, así como benzaldehído. Especies con más carbonos como valeraldehído, hexaldehído y tolualdehído tienden a formar picos amplios que se enciman entre ellos, así como de otras especies en las muestras de aire ambiente.

### 3.2.7 Sistema de Procesamiento y Manejo de Datos

Este sistema se compone de una computadora laptop conectada a un sistema Fieldpoint de National Instruments, que contiene 24 canales análogo a digital, 8 canales digital a análogo, 36 salidas digitales, 8 entradas digitales de propósito general y 4 contadores de entrada. Estos incluyen varias entradas y salidas extras, que las requeridas por el sistema RAVEM, haciendo que sea fácil la interfaz con sensores auxiliares.

El sistema RAVEM mide y graba grandes cantidades de datos segundo a segundo durante cada prueba de emisiones, incluyendo entradas crudas y concentraciones calculadas de CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, la tasa de flujo a través del CVS, la posición de la mariposa y la lectura del sensor de presión diferencial. Los datos de calibración relacionados con las entradas crudas también son grabados, haciendo posible recalcular los resultados segundo a segundo utilizando la calibración al final de la prueba. La temperatura de escape, así como dos temperaturas adicionales y

opcionales so grabadas también segundo a segundo. Además de la temperatura, también se guarda al principio de cada prueba la presión barométrica y humedad. Todos estos datos se guardan en un archivo separado para cada prueba en formato binario compacto.

Una utilidad de lectura de archivos es parte del sistema RAVEM. Esta utilidad se puede usar para revisar y corregir los datos recolectados para cada prueba, así como para agregar información desarrollada después de la prueba, tal como los datos del pre- y post- pesado de filtros de PM. Esta utilidad también permite transferir los datos a formato de Microsoft Excel, la cual tiene formato de lectura sencilla y permite su manipulación. Junto con este informe se entrega un CD ROM que contiene hojas de cálculo de Excel, que permite combinar los resultados individuales de las pruebas.

### 3.2.8 Entradas Auxiliares

Las entradas auxiliares del sistema RAVEM incluyen un sistema receptor de posicionamiento global (GPS), un sensor de velocidad Doppler, y un medidor de corriente para medir el flujo de corriente dentro y fuera de las baterías de un vehículo híbrido. El sistema GPS provee la localización tridimensional y velocidad basadas en la red de posicionamiento global. Estos datos se obtienen y guardan a una velocidad de 1Hz.

El sensor de velocidad Doppler funciona al medir el cambio Doppler en una señal de radar emitida hacia el piso bajo el vehículo. El resultado se expresa como una frecuencia de pulso del mismo sensor. Esta frecuencia se traduce en velocidad por el sistema procesador de datos, y se guarda segundo a segundo durante la medición de emisiones. La relación entre la variación del sensor Doppler y la velocidad del vehículo varía con el coseno del ángulo entre la línea de centro y el piso, haciendo necesario el la medición de este ángulo para cada vehículo. Este ángulo varía con la carga del vehículo y su aceleración, afectando los resultados. Al respecto, el sensor Doppler fue solicitado originalmente debido a la falta de confiabilidad y precisión de los datos del GPS. Sin embargo, la comparación de los datos de ambas fuentes da resultados muy similares, sugiriendo que en el futuro, las campañas de medición de emisiones el sistema GPS sea suficiente.

## 3.3 MEDIDAS DE CONTROL DE CALIDAD

Los procedimientos de operación incluyen varias medidas de aseguramiento de calidad (*QA – quality assurance*). Dos procedimientos de QA clave son los de Recuperación de CO<sub>2</sub> y Consumo de Combustible. Durante el procedimiento de Recuperación de CO<sub>2</sub> se inyecta gas CO<sub>2</sub> de un cilindro a presión al túnel de dilución, y se compara la masa de CO<sub>2</sub> medida, con el cambio de peso del cilindro de CO<sub>2</sub>. Esto confirma la precisión de la medición de flujo del CVS, así como el sistema de muestreo de gases y el analizador de CO<sub>2</sub>. Como se mencionó antes, el procedimiento de recuperación de CO<sub>2</sub> realizados antes de las pruebas de correlación con el WVU, mostraron una discrepancia del 6 al 8%. La fuente de esta discrepancia, se determinó posteriormente, fue una fuga a través del hoyo de un tornillo que salió de su lugar. Una vez que este tornillo fue sustituido, los chequeos de recuperación de CO<sub>2</sub> mostraron cercana correlación con entre las emisiones de CO<sub>2</sub> medidas por el RAVEM y entre el cambio de peso del cilindro.

Los chequeos de cambio de combustible comparan la masa de combustible consumido por el vehículo y el consumo de combustible calculado a partir de las emisiones de CO<sub>2</sub> y CO por balance de masa de carbono. Adicionalmente al chequeo del sistema de CVS y sistema de muestreo de gases, este procedimiento verifica la operación del sistema isokinético de muestreo. La Tabla 4 resume las pruebas de consumo de combustible realizadas antes, durante, y después del programa de correlación con el laboratorio del WVU.

**Tabla 4: Resultados de recuperación de combustible del RAVEM**

Núm de Archivo	Fecha/hora de prueba	Vehículo	Ciclo de Manejo	Combustible Calculado	Combustible Medido	Calculado/ Medido
MX0017	10/30/04 12:55	RTP 23-955*	Módulo 23	1,161	1,317	88.1%
MX0023	10/31/04 19:17	RTP 23-955*	Módulo 23	965	1,305	74.0%
MX0081	11/12/04 21:23	RTP 23-955**	CBD	914	905	101.0%
MX0193	1/7/05 12:34	RTP 23-0992 <sup>+</sup>	Módulo 23 sin ralenti	941	1,040	90.5%
MX0194	1/7/05 13:04	RTP 23-0992 <sup>+</sup>	Ralenti continuo	1,014	980	103.5%
MX0203	1/10/05 9:35	RTP 23-1003	Insurgentes Norte	7,871	8,196	96.0%
MX0282	2/3/05 2:42	Busscar GNC	Insurgentes Corredor	6,932	6,750	102.7%
MX0288	2/4/05 4:06	FAW GNC Bus	Insurgentes Corredor	10,353	10,000	103.5%
MX0289	2/4/05 5:36	FAW GNC Bus	Insurgentes Corredor	9,229	8,800	104.9%

\* Prueba con punta defectuosa MX01

\*\* Prueba de correlación con WVU (*West Virginia University Emissions Lab*)

<sup>+</sup> Probablemente afectado por una fuga de combustible

Adicionalmente, se llevaron a cabo chequeos de recuperación de combustible en septiembre y octubre del 2005, durante la evaluación de emisiones a vehículos de otro programa (para determinar la reducción de emisiones con sistemas de reducción de emisiones retroadaptados). Estas pruebas adicionales mostraron porcentajes de recuperación de combustible de entre 75 y 85 por ciento. Sin embargo, chequeos extensivos del RAVEM mostraron que el sistema operaba apropiadamente. Adicionalmente, los resultados de emisiones en la ruta de manejo Módulo 23 – utilizada en el otro proyecto-, resultaron consistentes con los obtenidos de los mismos vehículos durante noviembre 2004 y enero del 2006. Esto sugiere que el desempeño del sistema RAVEM no cambió durante el curso del programa. Una explicación posible del conflicto entre estos datos es que pudieron existir fugas, ya sea de combustible o gas de escape en el vehículo evaluado. Sin embargo, la fuente de la discrepancia no ha sido aún encontrada.

### 3.4 PRUEBAS DE CORRELACIÓN

Para determinar la correlación entre los resultados del sistema RAVEM, y los resultados de un sistema convencional de flujo total de CVS, se llevaron a cabo una serie de pruebas de correlación entre el sistema RAVEM, y el laboratorio de chasis transportable de la Universidad de West Virginia (WVU). Los resultados de esas pruebas se informan en un informe conjunto (WVU-EF&EE report<sup>8</sup>). Las principales conclusiones de ese documento son:

- Los datos de masa de CO<sub>2</sub> correlacionaron bien con los valores del WVU, pero fueron en promedio 18% más bajos que las mediciones del WVU. Por otro lado, los datos del RAVEM estuvieron muy cercanos en la única prueba dentro del programa, donde se

midió la masa del consumo de combustible. Los resultados de subsecuentes mediciones de masa de consumo de combustible también reflejaron buena correlación con los resultados del RAVEM. Son necesarias pruebas adicionales de correlación para resolver esta discrepancia satisfactoriamente.

- Las mediciones de masa de NO<sub>x</sub> del RAVEM también correlacionaron bien con WVU, pero en promedio fueron 16% más bajas que los valores del WVU. Combinados con los datos de CO<sub>2</sub>, este hecho sugiere muestreo limitado del 16-18%, comparado con el sistema del WVU.
- Los coeficientes de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> del RAVEM correlacionaron de manera razonable con los del WVU.
- Los datos de CO del RAVEM fueron en promedio 34% del los valores del WVU. Estas mediciones parecen haber sido afectadas por agua e interferencias de CO<sub>2</sub> a muy bajas concentraciones de CO, observadas durante el programa de correlación. Las mediciones a más altas concentraciones de CO, por ejemplo en vehículos a gasolina) probablemente mostrarían mayor correlación.
- En el caso de los valores de menos de 25 g/ciclo de CO del WVU, la mayoría de los valores de CO fueron a niveles igual o menores que 0 g/ciclo, lo cual es consistente con la hipótesis de que estos resultados fueron afectados por diferentes respuestas al agua y a interferencias de CO<sub>2</sub> en ambos analizadores.
- Los datos de PM del RAVEM fueron en promedio alrededor de 57% de los resultados de PM del WVU. Después de eliminar el supuesto muestreo parcial registrado, comparado con el sistema WVU, los datos de PM del RAVEM fueron alrededor de 30% menores que los resultados del WVU, pero muy similares en magnitud a los resultados del WVU TEOM. Esta diferencia es seguramente debido a efectos de dilución y colección de PM entre los dos sistemas, resultando en diferentes niveles de condensación y retención de compuestos orgánicos volátiles. El sistema RAVEM utiliza un coeficiente de dilución mucho más elevado que el sistema del WVU, y es probable que esto resultara en la menor retención de especies orgánicas semivolátiles (Durante pruebas de manejo real, las condiciones de dilución de gas de escape son inclusive más elevados que para el RAVEM, por lo que los resultados del RAVEM pudieran ser más representativos de formación de PM bajo condiciones de manejo real).

La discrepancia entre los sistemas RAVEM y WVU para emisiones gaseosas parece debida a diferencias sistemáticas en mediciones de flujo del CVS entre los dos sistemas, mientras que la diferencia entre resultados de emisiones de PM es probablemente debida a la misma diferencia que para las mediciones de gases y las diferencias en coeficientes de dilución. Dichas diferencias no son del todo sorprendentes, pues comparaciones interlaboratorio entre cinco laboratorios de chasis para vehículos pesados<sup>9</sup> (incluyendo al laboratorio del WVU) encontraron variaciones sustanciales entre dichos laboratorios, para mediciones gaseosas y de PM.

Bajo estas circunstancias no es posible determinar si los resultados del WVU o el sistema RAVEM son más correctos, por lo que pruebas adicionales de correlación (con recuperación de combustible) han sido propuestas para resolver el tema. En el caso de emisiones gaseosas, el hecho de que pruebas recientes de recuperación de combustible en el RAVEM muestran que solo

75 al 80% del combustible ha sido medido, sugiere que los datos del WVU son más correctos –en donde los resultados del RAVEM serían de manera sistemática 20% más bajos. Con respecto de las emisiones de PM, los coeficientes de dilución más bajos empleados por el CVS del sistema del WVU tenderían a sobre-colectar las especies de PM de compuestos orgánicos semi-volátiles, mientras que el más elevado coeficiente de dilución es más representativo de formación de PM en la atmósfera.

## 4. RESULTADOS DE EMISIONES DE MASA

### 4.1 PM, NOx, CO, CO<sub>2</sub>, Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Los Resultados del RAVEM para partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de los autobuses a diesel están resumidos en la Tabla 5. La Tabla 6 resume la misma información de los autobuses a gas natural, y también de los microbuses. El consumo másico de combustible, calculado por balance de carbono, también se muestra en estas tablas. Este valor fue calculado al multiplicar las mediciones de CO por 12/44 (la fracción de masa de carbón en una molécula de CO<sub>2</sub>), y la medición de emisiones de CO por 12/28 (la fracción de masa de carbón en una molécula de CO), y después sumando los resultados para obtener el total de emisiones de carbono. Las emisiones de carbono en la forma de VOC sin quemar fueron ignoradas, ya que esta masa es muy pequeña comparada con las emisiones de CO<sub>2</sub> y CO. La suma resultante fue entonces dividida entre el contenido de carbón del combustible en cuestión, expresada como fracción de masa. La fracción de masa de carbono en el combustible fue tomada como 0.867% (que corresponde a la composición de combustible de CH<sub>1.85</sub>) para el diesel y gasolina, 0.76% para gas natural, y 0.82% para gas L.P. La información técnica de la composición elemental de los combustibles no estuvo disponible; sin embargo, los valores utilizados deberán ser precisos dentro en un porcentaje pequeño.

La Figura 4 es una gráfica de barras que compara las emisiones de PM entre los vehículos a diesel, mientras que la Figura 6 y la Figura 8 comparan las emisiones de NO<sub>x</sub> y consumo de combustible, respectivamente. Las Figura 5, Figura 7, y Figura 9 comparan la misma información para los autobuses a gas natural y microbuses. Las barras de error de estas gráficas muestran los límites mayores y menores del intervalo de confianza del 90%, calculados de la desviación estándar de los datos de pruebas múltiples tomadas en cada punto. No se muestran barras de error, donde solo estuvo disponible una sola prueba, pues la desviación estándar en ese caso no está definida.

Entre los vehículos a diesel evaluados, las emisiones de PM y NO<sub>x</sub>, del vehículo Allison híbrido-eléctrico equipado con DPF (*diesel particle filter*), fueron las más bajas – comparables a las emisiones de PM de los autobuses a gas natural –. El Eletrabús híbrido también mostró muy bajas emisiones de PM, pero las emisiones más altas de NO<sub>x</sub> de cualquiera de los autobuses evaluados. El RTP 3 y RTP 4 – los dos vehículos de RTP equipados con DPF –, también tuvieron muy bajas emisiones de PM, y estas emisiones parecieron reducirse más aún en el transcurso del programa de demostración (esto puede ser atribuible debido al efecto de filtrado de las cenizas dentro del DPF).

Entre los autobuses a diesel sin DPF, los RTP 1 y RTP 2 mostraron niveles moderados de emisiones de PM, reflejando su relativamente reciente año/modelo, y el buen mantenimiento general de la flota de RTP. Las emisiones de PM de los metrobuses Volvo y Scania fueron significativamente más altas basados en una comparación por kilómetro recorrido, reflejando un

más alto consumo de combustible y generación de trabajo requerido por estos grandes autobuses articulados. Los motores en los autobuses de RTP estaban certificados a los estándares de emisión mexicanos para motores pesados a diesel, los cuales son equivalentes a los estándares US-EPA 1998; mientras que los motores de los metrobuses Volvo y Scania estaban certificados a los estándares de emisión Euro 3. El motor reconstruido del metrobús Fénix era un motor Detroit diesel de dos tiempos modelo 1991. La información de su certificación de emisiones no estuvo disponible, pero es posible que cumpliera con los estándares US-EPA 1991.

**Tabla 5: Emisiones reguladas y eficiencia de autobuses a diesel**

Vehículo	Fecha de Prueba	Ruta de Manejo	Núm de Pruebas	Emisiones - g/km								Combustible g/km	
				PM		NOx		CO		CO <sub>2</sub>		Prom.	σ
				Prom.	σ	Prom.	σ	Prom.	σ	Prom.	σ		
<b>Autobuses a Diesel</b>													
RTP 1	14-Dic-2004	Norte	3	0.26	0.05	8.6	0.1	2.2	2.4	945	4	298	2
	14-Dic-2004	Corredor	3	0.25	0.01	8.1	0.7	Neg.	2.6	908	97	285	32
	26-May-2005	Corredor	3	0.17	0.01	7.2	0.3	2.4	0.4	816	37	258	12
	29-Sep-2005	Corredor	3	0.19	0.02	6.9	0.4	2.1	1.1	825	25	260	8
RTP 2	6-Dic-2004	Norte	1	0.28	-	16.2	-	1.2	-	1,214	-	382	-
	6-Dic-2004	Corredor	2	0.23	0.02	15.3	1.4	3.9	3.0	1,077	2	341	2
Vol 12	11-Feb-2005	Norte	2	0.68	0.05	12.1	0.9	12.8	0.8	1,007	123	323	39
	11-Feb-2005	Corredor	3	0.63	0.07	11.6	0.4	11.6	1.1	1,031	8	330	3
	13-Jun-2005	Corredor	3	0.55	0.08	9.6	0.4	9.9	0.9	807	30	259	10
	6-Sep-2005	Corredor	2	0.68	0.01	9.4	0.2	11.2	0.4	822	41	264	13
Sc 18	8-Feb-2005	Norte	2	2.08	0.07	7.7	0.1	10.6	2.1	1,684	135	535	41
	8-Feb-2005	Corredor	3	1.55	0.07	7.0	0.3	6.5	2.3	1,685	95	559	72
MB 10	9-Nov-2004	Norte	3	0.13	0.01	5.0	0.3	1.4	0.3	573	199	181	62
	9-Nov-2004	Corredor	2	0.11	0.01	5.8	0.1	1.9	0.2	651	14	206	4
MB 11	24-Jun-2005	Corredor	3	0.07	0.01	8.8	0.3	2.0	0.9	763	59	241	19
	28-Sep-2005	Corredor	3	0.10	0.01	8.0	0.4	1.9	0.4	746	62	236	20
MB 12	16-Dic-2004	Norte	3	0.22	0.01	14.5	0.1	4.1	1.7	1,224	19	387	7
	16-Dic-2004	Corredor	3	0.17	0.05	13.7	0.6	4.5	1.8	1,164	43	368	13
<b>Metrobuses a Diesel</b>													
RTP	7-Sep-2005	Corredor	3	0.45	0.08	12.2	0.7	2.5	0.6	1,574	82	497	26
CISA	8-Sep-2005	Corredor	3	0.33	0.02	16.9	1.2	8.1	0.6	1,385	71	440	22
Fénix	9-Sep-2005	Corredor	3	0.97	0.13	10.7	0.3	8.2	1.2	1,558	59	495	19
<b>Autobuses a Diesel con Control de Emisiones Adicional</b>													
RTP 3	8-Dic-2004	Norte	2	0.06	0.02	8.3	0.6	0.8	0.5	881	27	277	9
	8-Dic-2004	Corredor	3	0.08	0.04	7.6	0.5	1.2	1.0	903	33	285	10
	23-May-2005	Corredor	3	0.06	0.02	6.1	0.7	0.4	0.9	756	86	238	27
	12-Sep-2005	Corredor	3	0.01	0.01	5.4	0.2	1.3	1.8	721	37	228	12
RTP 4	3-Dic-2004	Norte	3	0.07	0.01	14.9	0.6	Neg.	2.2	1,274	34	399	12
	3-Dic-2004	Corredor	3	0.04	0.01	14.7	0.5	0.0	3.3	1,251	57	394	19
Allison	6-Nov-2004	Norte	3	0.03	0.01	7.4	0.4	Neg.	3.6	1,062	120	333	39
	6-Nov-2004	Corredor	3	0.03	0.01	5.8	0.4	Neg.	3.1	1,203	94	378	28
Eletrabuss	28-Sep-2005	Corredor	3	0.05	0.00	21.3	0.2	3.0	1.1	946	4	299	1

Prom = Promedio Aritmético

Entre los vehículos nuevos a diesel, el MB10 y el MB11 mostraron los niveles más bajos de NOx y PM. El MB10 aparentemente está certificado a los estándares US-EPA 2004, mientras que el MB11 está certificado a US-EPA 1998. Las emisiones de NOx de los autobuses Volvo y Scania certificados a Euro 3 fueron también bajas pero las emisiones de PM de esos vehículos fueron mucho más elevadas que las de otros vehículos evaluados dentro del programa. La diferencia en emisiones de PM entre el vehículo Sc18 y el metrobús de RTP es muy notable. Ambos vehículos eran autobuses articulados de 18 metros hechos por Scania, y aparentemente equipados con motores Scania DC9, 300HP. Por lo tanto la diferencia de emisiones de PM de hasta 300% sugiere que el autobús de demostración pudiera no haber estado operando adecuadamente, o bien pudiera no haber sido ajustado para la altitud de la Ciudad de México. Sin embargo, en comunicación por correo electrónico con un representante de Scania<sup>10</sup>, mencionó que el autobús estaba calibrado para una altitud de hasta 3,000 metros. En el caso del autobús Volvo el representante indicó que el motor no había sido ajustado para la Ciudad de México, y que adicionalmente había ocurrido un problema con el turbo cargador durante la mayor parte del programa de demostración.

**Tabla 6: Emisiones reguladas y eficiencia de autobuses a gas natural y microbuses**

Vehículo	Fecha de Prueba	Ruta de Manejo	Núm de Pruebas	Emisiones - g/km								Combustible	
				PM		NOx		CO		CO <sub>2</sub>		g/km	
				Avg.	$\sigma$	Avg.	$\sigma$	Avg.	$\sigma$	Avg.	$\sigma$	Avg.	$\sigma$
<b>Autobuses a Gas Natural</b>													
Busscar	3-Feb-2005	Norte	3	0.04	0.03	5.6	0.2	0.0	0.0	1,087	20	390	7
	3-Feb-2005	Corredor	2	0.00	0.01	4.4	0.9	0.2	0.3	945	158	339	57
	8-Jun-2005	Corredor	3	0.01	0.03	6.4	0.4	Neg.	0.4	913	7	328	3
	3-Oct-2005	Corredor	3	0.01	0.01	5.7	0.4	0.0	0.1	768	65	276	23
FAW	4-Feb-2005	Norte	3	0.03	0.02	8.3	0.3	Neg.	0.8	1,100	58	395	21
	4-Feb-2005	Corredor	2	0.02	0.00	9.9	1.9	5.1	8.3	1,261	28	455	5
	27-Jun-2005	Corredor	3	0.03	0.04	14.4	0.7	0.6	1.0	1,184	38	425	14
	4-Oct-2005	Corredor	3	0.03	0.01	6.7	0.9	Neg.	2.3	1,021	34	365	14
Ankai	5-Feb-2005	Norte	3	0.02	0.01	6.1	0.2	0.6	0.7	1,051	31	378	11
	5-Feb-2005	Corredor	3	0.02	0.00	4.8	0.3	0.4	0.1	924	32	332	11
	5-Oct-2005	Corredor	3	0.02	0.00	3.9	0.9	Neg.	0.3	842	84	302	30
<b>Microbuses</b>													
M-LPG	24-Feb-2005	Norte	1	0.02	-	3.3	-	82.1	-	605	-	244	-
	24-Feb-2005	Corredor	2	0.02	0.01	4.6	0.2	79.5	0.4	759	11	294	3
	11-Nov-2005	Montevideo	1	na	-	3.6	-	55.7	-	431	-	173	-
M-CNG	9-Mar-2005	Norte	2	0.01	0.01	4.8	0.0	30.1	6.3	530	27	207	13
	9-Mar-2005	Corredor	1	0.01	-	3.9	-	40.1	-	479	-	195	-
M-D-CNG	3-Jun-2005	Corredor	3	0.01	0.01	2.7	0.2	Neg.	0.4	527	10	189	4
	7-Oct-2005	Corredor	1	0.00	-	7.2	-	4.1	-	587	-	213	-
M-D-Gsln	6-Jun-2005	Corredor	3	0.01	0.00	0.3	0.0	147.8	11.0	661	42	281	12
	6-Oct-2005	Corredor	2	0.01	0.00	0.1	0.0	235.0	17.7	646	39	319	21
M-Gsln	10-Mar-2005	Norte	1	0.22	-	9.6	-	362.4	-	1,177	-	549	-
	10-Mar-2005	Corredor	2	0.16	0.03	8.9	0.3	250.2	44.1	915	70	412	44

M-LPG: Microbús a gas L.P.

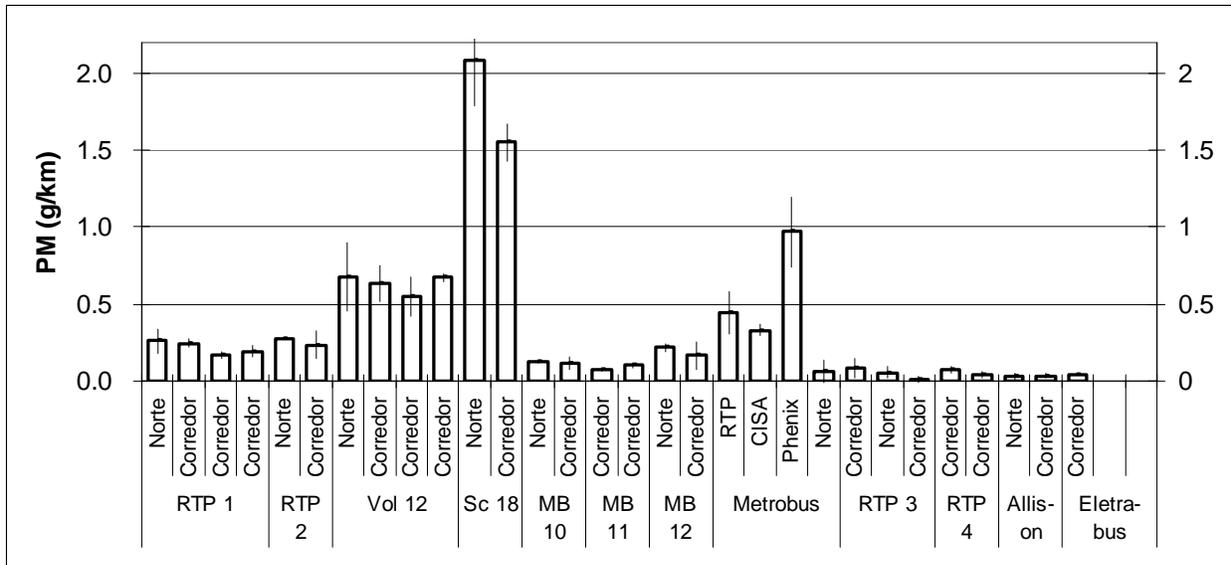
M-GNC: Microbús a gas natural comprimido GNC

M-Gsln: Microbús a gasolina

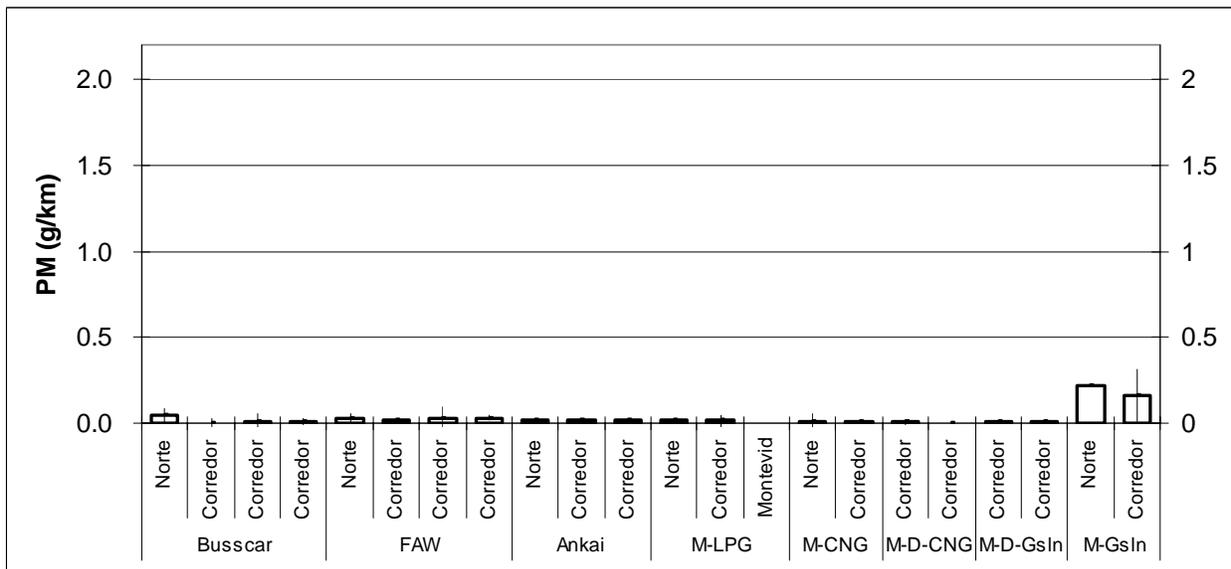
M-D-GNC: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

M-D-Gsln: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

Las emisiones de CO de todos los vehículos a diesel y gas natural fueron relativamente bajas –en la mayoría de los casos justo debajo de los límites de detección del sistema RAVEM. En algunos casos, la concentración de CO medida era ligeramente menor de los niveles de ambiente, resultando en un valor de emisión negativo. Estos valores negativos se indican las tablas como “neg”, y deberán ser interpretados como valores cero, o bajo el límite de detección. Entre los autobuses a diesel, las emisiones de CO más elevadas medidas fueron de los vehículos Vol 12 y Sc 18, los cuales también mostraron las emisiones más altas de PM también se observó una asociación entre altos niveles de CO y PM en vehículos a diesel en otros estudios<sup>11</sup>.



**Figura 4: Comparación de emisiones de PM de autobuses a diesel**



**Figura 5: Comparación de emisiones de PM de autobuses a gas natural y microbuses**

Las mediciones de PM y NO<sub>x</sub> de todos los autobuses a gas natural, del microbús a gas natural, y de la primera prueba del microbús a gas L.P., fueron muy bajas, como se esperaba. Excepto bajo condiciones de combustible muy ricas, el proceso de combustión de estos motores no forma partículas, así que las emisiones de PM se limitan a peñas cantidades de aceite lubricante. Sin embargo, de manera sorpresiva el microbús a gasolina si mostró emisiones de PM sustanciales. Las posibles fuentes de este exceso de PM son aceite lubricante en el escape (debido a pistones o

sellos de válvulas desgastados), y/o formación de hollín durante el proceso de combustión bajo condiciones de mezcla ricas. Este vehículo también mostró elevadas emisiones de CO, indicando que una parte sustancial de combustión de mezcla rica ocurrió durante la prueba. La segunda prueba de microbús a gas L.P. también mostró elevadas emisiones de PM. Sin embargo, las partículas se presentaron en pequeñas bolas de hollín negro, y se concluyó que ésta pudiera ser un artefacto del muestreo, y que la fuente de estas partículas serían las paredes de la línea de muestreo en vez del vehículo.

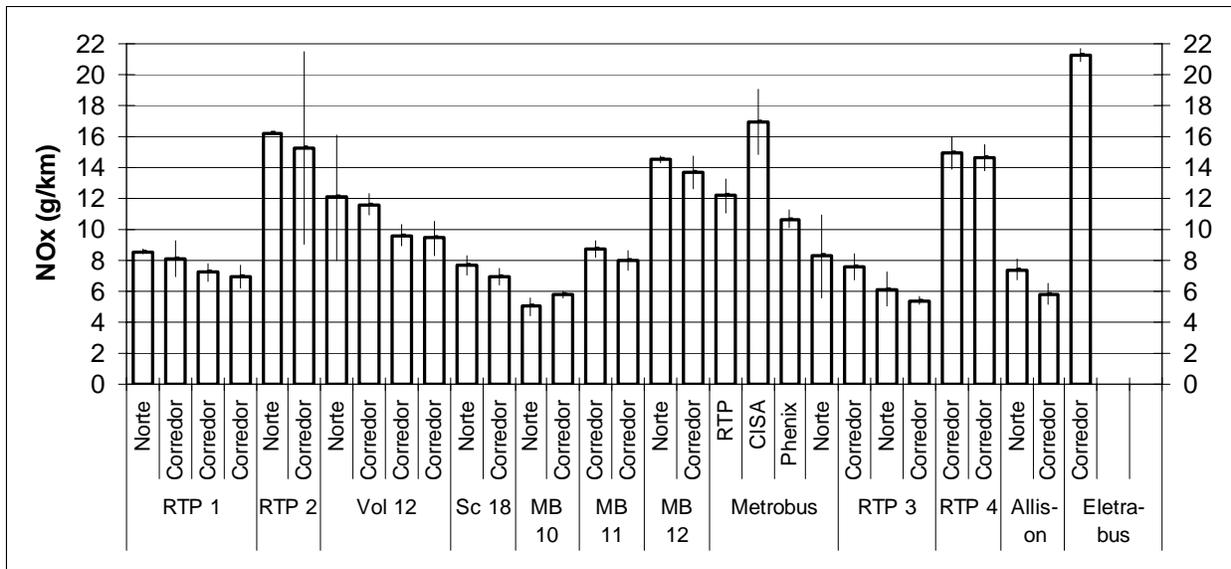


Figura 6: Comparación de emisiones de NOx de autobuses a diesel

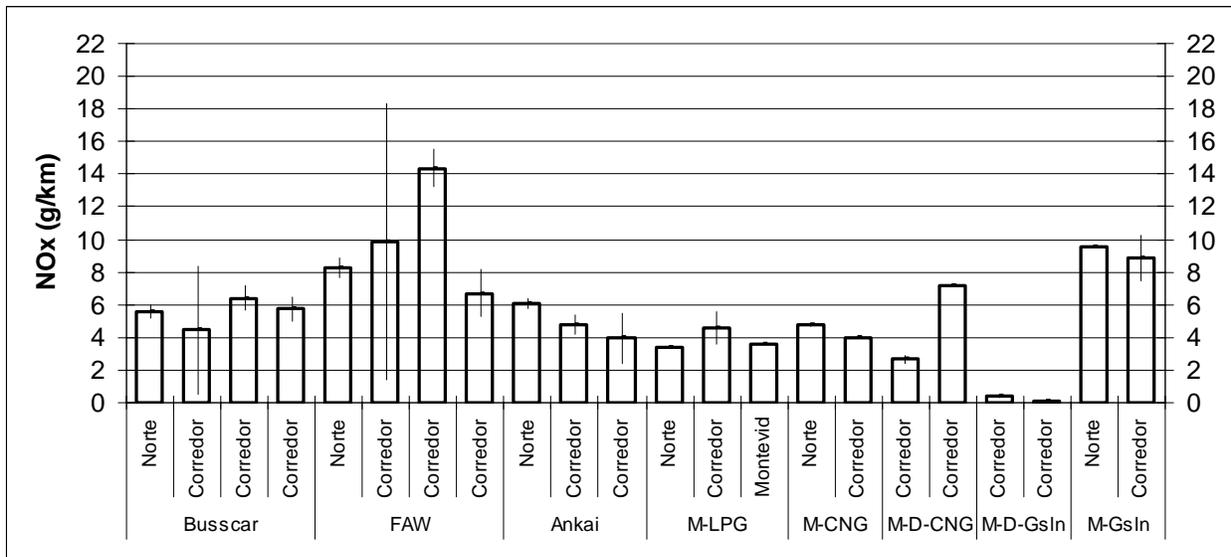
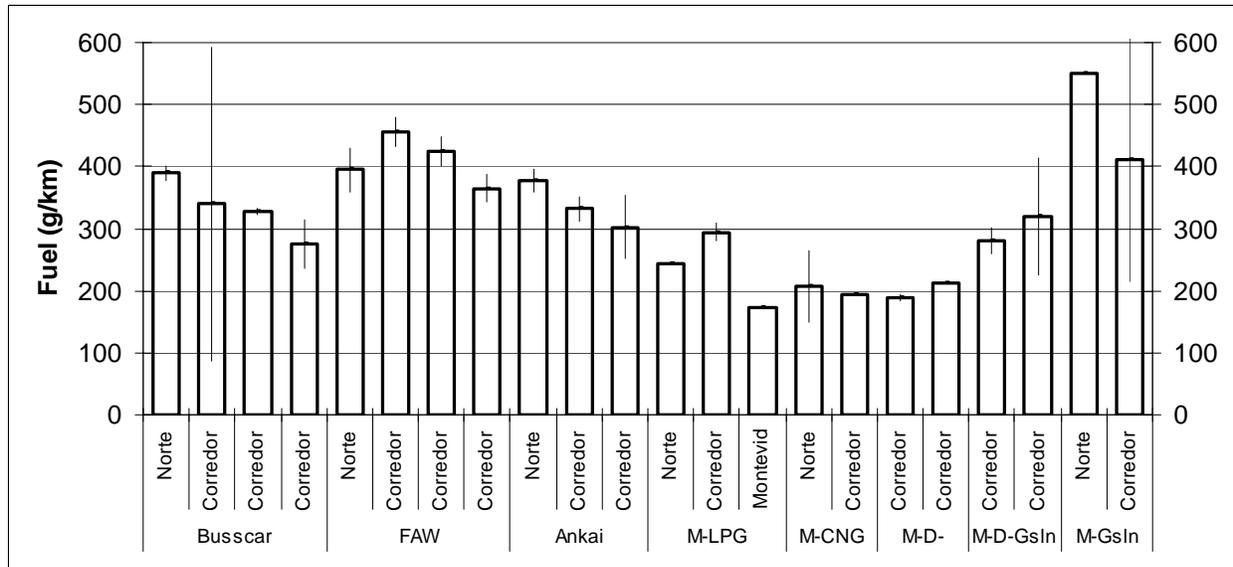


Figura 7: Comparación de emisiones de NOx de autobuses a gas natural y microbuses





**Figura 9: Consumo de combustible de autobuses a gas natural y microbuses**

El otro microbús a gasolina exhibió elevados niveles de NO<sub>x</sub> y CO, así como de partículas – indicando que el catalizador de tres vías ya no funcionaba adecuadamente. Los microbuses a GNC y gas L.P. mostraron niveles intermedios de emisiones de CO y NO<sub>x</sub>. Ya sea con GNC y gas L.P., la combinación de un catalizador de tres vías en buen estado y efectivo y un sistema de control cerrado de la relación aire combustible son capaces de lograr mucho menores niveles de emisiones de CO y NO<sub>x</sub> que los medidos en estos vehículos.

Comparando las emisiones resultantes de emisiones de las rutas de manejo, *Insurgentes Norte* y *Corredor de Insurgentes*, se puede apreciar que en las emisiones de PM son casi siempre menores en la ruta dentro del Corredor, debido a la reducción de condiciones de paro/arranque. El consumo de combustible, así como las emisiones de NO<sub>x</sub>, fueron frecuentemente tan elevadas o más elevadas en el *Corredor de Insurgentes* que en la ruta *Insurgentes Norte* durante la primer campaña de pruebas, pero fueron generalmente más bajas en las campañas dos y tres. Durante la primer campaña de pruebas, muchos de los conductores tomaron ventaja de la ausencia de tráfico para implementar la velocidad durante las pruebas de corredor resultando en un incremento en el consumo de combustible, esta tendencia fue limitada durante las campañas dos y tres, cuando los conductores pudieron comparar su velocidad a la velocidad del metrobús en el carril confinado adyacente del *Corredor BRT*.

**Tabla 7: Cambio de emisiones debido a la operación simulada del corredor Insurgentes**

Vehículo	Ruta de Prueba	Núm de Test	Emisiones - g/km								Combustible g/km	
			PM		NOx		CO		CO <sub>2</sub>		Prom.	+/-
			Prom.	+/-*	Prom.	+/-	Prom.	+/-	Prom.	+/-		
<b>Autobuses a Diesel</b>												
RTP 1	Norte	3	0.26	0.08	8.6	0.2	2.2	4.0	945	6	298	4
	Corredor	9	0.20	0.02	7.4	0.4	1.4	1.2	849	43	268	14
Vol 12	Norte	2	0.68	0.22	12.1	4.0	12.8	3.6	1007	551	323	175
	Corredor	8	0.61	0.05	10.3	0.7	10.9	0.7	895	77	287	25
RTP 3	Norte	2	0.06	0.07	8.3	2.7	0.8	2.2	881	120	277	39
	Corredor	9	0.05	0.02	6.4	0.7	1.0	0.7	793	60	250	19
Reducción Promedio Diesel			18%	49%	17%	14%	10%	126%	10%	13%	10%	13%
<b>Autobuses a Gas Natural</b>												
Busscar	Norte	3	0.04	0.04	5.6	0.4	0.0	0.0	1087	33	390	12
	Corredor	8	0.01	0.01	5.7	0.6	Neg	0.2	867	72	311	26
FAW	Norte	3	0.03	0.03	8.3	0.6	Neg	1.3	1100	97	395	35
	Corredor	8	0.03	0.01	10.4	2.5	0.8	3.0	1142	73	410	27
Ankai	Norte	3	0.02	0.01	6.1	0.3	0.6	1.2	1051	52	378	19
	Corredor	8	0.02	0.00	4.4	0.5	0.1	0.2	883	48	317	17
Reducción Promedio GNC			30%	124%	0%	24%	234%	475%	11%	11%	11%	11%

\* 90% intervalo de confianza. Datos en GRIS son significativamente diferentes al 90% del nivel de confianza

Para evaluar la efectividad del corredor de autobuses llevamos a cabo análisis estadístico de los resultados de emisiones. Ya que los resultados no estaban dominados por el manejo agresivo de la primer campaña de emisiones, limitamos el análisis a esos vehículos para los que existía información sobre el corredor Insurgentes durante las tres campañas de muestreo. Esto limitó los datos a tres autobuses a diesel y tres a GNC. Los resultados se muestran en la Tabla 7. Tres de los seis autobuses muestran resultados estadísticamente significativos en consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>. La reducción promedio fue del 10% para los tres vehículos a diesel combinados y el 11% para los tres autobuses a GNC. Sin embargo, ningún valor fue estadísticamente significativo al nivel de confianza del 90%.

Las emisiones de NOx de los autobuses a diesel convencionales, al menos de los evaluados dentro de este programa, mostraron una variedad sorprendente entre los diferentes fabricantes, particularmente dado que todos estarían diseñados y calibrados para cumplir con los estándares de emisión US EPA 1998, U.S. EPA 2004, o Euro 3. Estos estándares limitan las emisiones de NOx a 4.0, 2.4, y 3.7 g/BHP-hr, respectivamente.

Para los vehículos a diesel las emisiones en gramos por BHP-hr se pueden estimar con bastante precisión al medir el consumo de combustible por kilómetro entre el consumo promedio “brake-specific” ya que los datos BSFC para el motor específico no estuvo disponible para estos autobuses se asumió un valor BSFC típico de 170 gramos por BHP-hr. Este valor debe estar dentro del 10% del valor real BSFC para la mayoría de los motores a diesel comerciales. Los resultados de este cálculo se muestran en la Tabla 8.

Como la Tabla 8 muestra las emisiones de NOx del RTP 2 y RTP 4 –los dos autobuses Internacional– fueron equivalente alrededor de 6.3 y 7.6 gramos por BHP-hr comparados con un estándar de emisión de 4.0 gramos por BHP-hr. Para el Volvo de 12 metros y para el metrobús Volvo las emisiones NOx fueron alrededor de 6.0 a 6.5 gramos por BHP-hr. Para los autobuses Mercedes las emisiones NOx estuvieron en un rango de 4.7 a 6.4 gramos por BHP-hr. Las emisiones NOx del MB 10 no fueron inferiores a las del RTP 1, RTP 3 y MB 11 –los tres autobuses Mercedes certificados a US-EPA 1998. Por otro lado, las emisiones NOx del autobús Allison fueron generalmente consistentes con los niveles de certificación reportados. Las emisiones del metrobús Scania estuvieron cercanas al límite de emisiones del estándar Euro 3, el autobús de demostración Scania estuvo muy debajo de los niveles Euro 3. Esto último sugiere que el tiempo de inyección del Scania de demostración pudo haber estado demasiado retardado, lo que sería consistente con las emisiones excesivas de PM.

Las grandes diferencias entre niveles de NOx medidos y los NOx reportados por certificación, pudieran encontrarse en las diferencias de estrategias de calibración (en particular las respuestas a altitud y operaciones dinámicas) entre los diferentes fabricantes de motores. En algunos casos las diferencias son tan grandes que potencialmente podrían requerir investigación como “defeat devices”.

Ya que los autobuses evaluados son diseñados para llevar diferente número de pasajeros, es apropiado considerar las emisiones y consumo de combustible en pasajeros por kilómetro para comparar su desempeño. La Tabla 9 muestra estos datos para los autobuses a diesel, mientras que la Tabla 10 muestra estos datos para los autobuses a GNC y los microbuses. Estas tablas también muestran el número de pasajeros estimados para cada autobús. Ya que las pruebas de emisiones se condujeron con un lastre simulado al 70% de carga de pasajeros, aquí se calcularon las emisiones por pasajero-kilómetro en las mismas condiciones.

**Tabla 8: Emisiones de autobuses a diesel en gramos por BHP-hr (estimadas)**

Vehículo	Fecha de Prueba	Ruta de Manejo	Núm de Test	Emisiones – g/BHP-hr							
				PM		NOx		CO		CO <sub>2</sub>	
				Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$
<b>Autobuses a Diesel</b>											
RTP 1	14-Dec-2004	Norte	3	0.15	0.03	4.9	0.1	1.2	1.4	539	2
	14-Dec-2004	Corredor	3	0.15	0.01	4.8	0.4	Neg.	1.6	541	58
	26-May-2005	Corredor	3	0.11	0.01	4.8	0.2	1.6	0.3	538	25
	29-Sep-2005	Corredor	3	0.12	0.01	4.5	0.3	1.4	0.7	538	16
RTP 2	6-Dec-2004	Norte	1	0.12	-	7.2	-	0.5	-	540	-
	6-Dec-2004	Corredor	2	0.12	0.01	7.6	0.7	2.0	1.5	537	1
Vol 12	11-Feb-2005	Norte	2	0.36	0.03	6.3	0.5	6.7	0.4	530	65
	11-Feb-2005	Corredor	3	0.33	0.04	6.0	0.2	6.0	0.6	531	4
	13-Jun-2005	Corredor	3	0.36	0.05	6.3	0.3	6.5	0.6	530	20
	6-Sep-2005	Corredor	2	0.43	0.00	6.1	0.2	7.2	0.2	528	26
Sc 18	8-Feb-2005	Norte	2	0.66	0.02	2.4	0.0	3.4	0.7	535	43
	8-Feb-2005	Corredor	3	0.47	0.02	2.1	0.1	2.0	0.7	512	29
MB 10	9-Nov-2004	Norte	3	0.12	0.01	4.7	0.3	1.3	0.3	538	187
	9-Nov-2004	Corredor	2	0.09	0.01	4.8	0.0	1.6	0.1	538	11
MB 11	24-Jun-2005	Corredor	3	0.05	0.00	6.2	0.2	1.4	0.7	538	42
	28-Sep-2005	Corredor	3	0.07	0.01	5.8	0.3	1.3	0.3	538	45
MB 12	16-Dec-2004	Norte	3	0.10	0.01	6.4	0.1	1.8	0.7	538	8
	16-Dec-2004	Corredor	3	0.08	0.02	6.3	0.3	2.1	0.8	537	20
<b>Metrobuses a Diesel</b>											
RTP	7-Sep-2005	Corredor	3	0.15	0.03	4.2	0.2	0.8	0.2	538	28
CISA	8-Sep-2005	Corredor	3	0.13	0.01	6.5	0.5	3.1	0.2	535	27
Fénix	9-Sep-2005	Corredor	3	0.33	0.05	3.7	0.1	2.8	0.4	535	20
<b>Autobuses a Diesel con Control de Emisiones Adicional</b>											
RTP 3	8-Dec-2004	Norte	2	0.04	0.01	5.1	0.4	0.5	0.3	540	16
	8-Dec-2004	Corredor	3	0.05	0.02	4.5	0.3	0.7	0.6	539	20
	23-May-2005	Corredor	3	0.04	0.02	4.4	0.5	0.3	0.6	540	62
	12-Sep-2005	Corredor	3	0.01	0.01	4.1	0.1	1.0	1.3	539	28
RTP 4	3-Dec-2004	Norte	3	0.03	0.01	6.4	0.3	Neg.	1.0	543	15
	3-Dec-2004	Corredor	3	0.02	0.01	6.3	0.2	0.0	1.4	540	24
Allison	6-Nov-2004	Norte	3	0.01	0.01	3.8	0.2	Neg.	1.8	542	61
	6-Nov-2004	Corredor	3	0.02	0.00	2.6	0.2	Neg.	1.4	541	42
Eletrabus	28-Sep-2005	Corredor	3	0.03	0.00	12.1	0.1	1.7	0.6	538	2

**Tabla 9: Emisiones de autobuses a diesel por pasajero por kilómetro**

Vehículo	Fecha de Prueba	Ruta de Manejo	Núm de Test	Pasa- jeros/ Bus	mg/pasajero-km						g/pasajero-km			
					PM		NOx		CO		CO <sub>2</sub>		Combustible	
					Prom.	$\sigma$	Prom	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom	$\sigma$
<b>Autobuses a Diesel</b>														
RTP 1	14-Dec-2004	Norte	3	85	4.4	0.8	144	2	36	40	15.9	0.1	5.0	0.0
	14-Dec-2004	Corredor	3		4.1	0.2	136	12	-6	44	15.3	1.6	4.8	0.5
	26-May-2005	Corredor	3		2.9	0.2	122	6	40	7	13.7	0.6	4.3	0.2
	29-Sep-2005	Corredor	3		3.2	0.4	116	8	36	18	13.9	0.4	4.4	0.1
RTP 2	6-Dec-2004	Norte	1	85	4.7	-	272	-	20	-	20.4	-	6.4	-
	6-Dec-2004	Corredor	2		3.9	0.3	257	23	66	50	18.1	0.0	5.7	0.0
Vol 12	11-Feb-2005	Norte	2	90	10.7	0.8	191	14	203	13	16.0	2.0	5.1	0.6
	11-Feb-2005	Corredor	3		10.1	1.1	184	7	184	18	16.4	0.1	5.2	0.0
	13-Jun-2005	Corredor	3		8.7	1.2	152	6	158	15	12.8	0.5	4.1	0.2
	6-Sep-2005	Corredor	2		10.7	0.1	150	4	178	6	13.0	0.7	4.2	0.2
Sc 18	8-Feb-2005	Norte	2	160	18.6	0.6	68	1	94	19	15.0	1.2	4.8	0.4
	8-Feb-2005	Corredor	3		13.8	0.6	62	3	58	21	15.0	0.9	5.0	0.6
MB 10	9-Nov-2004	Norte	3	80	2.3	0.1	89	6	26	6	10.2	3.6	3.2	1.1
	9-Nov-2004	Corredor	2		2.0	0.2	103	1	34	3	11.6	0.2	3.7	0.1
MB 11	24-Jun-2005	Corredor	3	85	1.2	0.1	147	5	34	16	12.8	1.0	4.0	0.3
	28-Sep-2005	Corredor	3		1.7	0.2	135	6	31	7	12.5	1.0	4.0	0.3
MB 12	16-Dec-2004	Norte	3	90	3.5	0.2	230	2	64	27	19.4	0.3	6.1	0.1
	16-Dec-2004	Corredor	3		2.7	0.8	217	10	71	29	18.5	0.7	5.8	0.2
<b>Metrobuses a Diesel</b>														
RTP	7-Sep-2005	Corredor	3	160	4.0	0.7	109	6	22	6	14.1	0.7	4.4	0.2
CISA	8-Sep-2005	Corredor	3	160	3.0	0.2	151	11	72	5	12.4	0.6	3.9	0.2
Fénix	9-Sep-2005	Corredor	3	160	8.7	1.2	95	3	73	11	13.9	0.5	4.4	0.2
<b>Autobuses a Diesel con Control de Emisiones Adicional</b>														
RTP 3	8-Dec-2004	Norte	2	85	1.1	0.3	139	10	14	8	14.8	0.5	4.7	0.1
	8-Dec-2004	Corredor	3		1.4	0.7	128	8	21	17	15.2	0.6	4.8	0.2
	23-May-2005	Corredor	3		1.0	0.4	103	11	7	15	12.7	1.5	4.0	0.5
	12-Sep-2005	Corredor	3		0.2	0.2	91	3	22	30	12.1	0.6	3.8	0.2
RTP 4	3-Dec-2004	Norte	3	85	1.2	0.2	251	10	Neg.	38	21.4	0.6	6.7	0.2
	3-Dec-2004	Corredor	3		0.7	0.2	246	9	0	56	21.0	1.0	6.6	0.3
Allison	6-Nov-2004	Norte	3	110	0.4	0.2	96	5	Neg.	46	13.8	1.6	4.3	0.5
	6-Nov-2004	Corredor	3		0.4	0.1	76	5	Neg.	41	15.6	1.2	4.9	0.4
Eletrabu s	28-Sep-2005	Corredor	3	85	0.8	0.1	357	4	50	19	15.9	0.1	5.0	0.0

**Tabla 10: Emisiones de autobuses a gas natural y microbuses, por pasajero por kilómetro**

Vehículo	Fecha de Prueba	Ruta de Manejo	Núm de Test	Pasa-jeros/ Bus	mg/pasajero-km						g/pasajero-km			
					PM		NOx		CO		CO <sub>2</sub>		Combustible	
					Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$
<b>Autobuses a Gas Natural</b>														
Busscar	3-Feb-2005	Norte	3	85	0.7	0.4	93	4	1	0	18.3	0.3	6.6	0.1
	3-Feb-2005	Corredor	2		0.1	0.1	75	15	4	5	15.9	2.7	5.7	1.0
	8-Jun-2005	Corredor	3		0.2	0.4	107	7	Neg.	6	15.4	0.1	5.5	0.0
	3-Oct-2005	Corredor	3		0.2	0.2	96	7	1	1	12.9	1.1	4.6	0.4
FAW	4-Feb-2005	Norte	3	120	0.3	0.2	98	4	Neg.	10	13.1	0.7	4.7	0.3
	4-Feb-2005	Corredor	2		0.2	0.0	117	22	60	99	15.0	0.3	5.4	0.1
	27-Jun-2005	Corredor	3		0.4	0.4	171	8	7	12	14.1	0.5	5.1	0.2
	4-Oct-2005	Corredor	3		0.4	0.1	80	10	Neg.	27	12.2	0.4	4.3	0.2
Ankai	5-Feb-2005	Norte	3	85	0.3	0.1	102	3	11	12	17.7	0.5	6.3	0.2
	5-Feb-2005	Corredor	3		0.3	0.1	80	6	6	1	15.5	0.5	5.6	0.2
	5-Oct-2005	Corredor	3		0.3	0.1	66	15	Neg.	5	14.2	1.4	5.1	0.5
<b>Microbuses</b>														
M-LPG	24-Feb-2005	Norte	1	35	0.7	-	137	-	3351	-	24.7	-	10.0	-
	24-Feb-2005	Corredor	2		0.7	0.3	186	9	3245	14	31.0	0.4	12.0	0.1
	11-Nov-2005	Montev	1		na	-	147	-	2275	-	17.6	-	7.0	-
M-CNG	9-Mar-2005	Norte	2	35	0.4	0.5	196	1	1227	257	21.6	1.1	8.4	0.5
	9-Mar-2005	Corredor	1		0.4	-	161	-	1637	-	19.6	-	7.9	-
M-D-CNG	3-Jun-2005	Corredor	3	35	0.2	0.3	108	7	Neg.	16	21.5	0.4	7.7	0.1
	7-Oct-2005	Corredor	1		0.1	-	294	-	166	-	24.0	-	8.7	-
M-D-Gsln	6-Jun-2005	Corredor	3	35	0.2	0.1	14	1	6031	447	27.0	1.7	11.5	0.5
	6-Oct-2005	Corredor	2		0.3	0.1	4	1	9593	723	26.4	1.6	13.0	0.9
M-Gsln	10-Mar-2005	Norte	1	35	8.9	-	390	-	14791	-	48.0	-	22.4	-
	10-Mar-2005	Corredor	2		6.5	1.4	362	12	10214	1799	37.4	2.9	16.8	1.8

M-LPG: Microbús a gas L.P.

M-GNC: Microbús a gas natural comprimido GNC

M-Gsln: Microbús a gasolina

M-D-GNC: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

M-D-Gsln: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

#### 4.2 EFECTOS DE REPOTENCIACIÓN A UN AUTOBÚS MODELO 1991

Por solicitud expresa de la SMA, dentro del proyecto, se llevaron a acabo pruebas limitadas a dos autobuses Mercedes Benz 1991 de la flota de RTP. Uno de estos autobuses, marcado como RTP 5 en la siguiente tabla, estaba equipado con un motor original modelo 1991. Los estándares de emisión mexicanos en 1991, eran, efectivamente, Euro Zero. El segundo autobús (RTP 6) habría sido repotenciado con un motor Mercedes OM-366-LA, que cumple con los estándares de emisión mexicanos actuales, equivalentes a US EPA 1998. En vez de las rutas sobre Insurgentes, estos vehículos fueron evaluados en un ciclo más corto y de menor velocidad llamado *Ruta de Manejo RTP 23*, diseñada para simular operación de autobuses de pasajeros en calles centrales de la Ciudad. Los resultados se resumen en la Tabla 11, como esta tabla muestra, los efectos de

repotenciación fueron dramáticos – las emisiones de PM del autobús repotenciado se redujeron en un 88%, las emisiones de NOx en un 59% y las emisiones de CO en un 86%, mientras que la economía de combustible fue la misma en ambos autobuses. Lo anterior muestra que la repotenciación con un motor moderno, con control de emisiones, mantiene una gran promesa para la reducción de emisiones contaminantes de vehículos viejos.

**Tabla 11: Emisiones y consumo de combustible del vehículo 1991 repotenciado y no repotenciado**

Vehículo	Fecha de Prueba	Ruta de Manejo	Núm Pruebas	Emisiones – g/km				Combustible g/km
				PM	NOx	CO	CO <sub>2</sub>	
RTP-5	30-Jun-2005	RTP-23	3	2.25	24.3	31.9	1,186	389
RTP-6	29-Jun-2005	RTP-23	3	0.27	10.0	4.5	1,233	390

### 4.3 CARBONILOS

El equipo para la medición de carbonilos y COVs fue comprado más tarde que el resto del sistema RAVEM, y no estuvo disponible para su uso hasta que la mayor parte de las pruebas en los vehículos a diesel fueron realizadas durante la primer campaña. La primer ronda de pruebas en los autobuses y metrobuses a gas natural fue retrasada hasta que este equipo estuvo disponible, ya que esa información fue considerada mucho más importante para los combustibles gaseosos. Por tanto, las mediciones de carbonilos están disponibles para los autobuses que utilizan combustibles gaseosos y para los autobuses a diesel evaluados en la segunda campaña. Las mediciones de carbonilos se resumen en la Tabla 12 y Tabla 13. Como se muestra en estas tablas, las emisiones de carbonilos fueron generalmente bajas, y exhibieron gran variabilidad de prueba a prueba. Esta variabilidad es en gran medida atribuible al “ruido” creado por las altas concentraciones ambientales o de línea base, las cuales fueron generalmente del mismo orden de magnitud que las concentraciones detectadas en las muestras.

La principal preocupación ambiental con respecto a las emisiones de carbonilos, fue para los autobuses equipados con motores “lean-burn” a gas natural, ya que estos pueden producir cantidades significativas de formaldehído. Sin embargo, los datos de la Tabla 12 muestran que los convertidores catalíticos instalados en estos autobuses fueron efectivos en el control de las emisiones de carbonilos. Las emisiones más altas de formaldehído fueron encontradas en los microbuses y en el autobús a diesel Volvo 12. El autobús Volvo también exhibió emisiones más elevadas de lo normal de varias otras especies de aldehídos.

Tabla 12: Emisiones de Carbonilos

Vehículo	Fecha	Ruta de Manejo	Núm Tests	Emisiones de Aldehídos - g/km							
				Formald.		Acetald.		Acetone+ Acr.		Propionald.	
				Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$
<b>Autobuses a Diesel</b>											
RTP 1	26-May-2005	Corredor	3	0.015	0.009	0.013	0.030	0.021	0.008	0.008	0.013
	29-Sep-2005	Corredor	3	0.005	0.002	neg.	0.007	neg.	0.010	0.004	0.005
Vol 12	11-Feb-2005	Norte	3	0.055	0.027	0.034	0.039	0.015	0.027	0.021	0.020
	11-Feb-2005	Corredor	2	0.041	0.027	0.101	0.006	0.075	0.107	0.051	0.072
	13-Jun-2005	Corredor	1	0.049	-	0.108	-	neg.	-	0.052	-
	8-Oct-2005	Corredor	2	0.001	0.005	neg.	0.009	0.006	0.007	0.001	0.06
Sc 18	8-Feb-2005	Norte	3	0.011	0.010	0.016	0.016	0.027	0.018	0.002	0.025
	8-Feb-2005	Corredor	3	0.017	0.014	0.006	0.018	0.012	0.031	0.023	0.025
MB 11	24-Jun-2005	Corredor	3	0.011	0.004	0.017	0.008	0.028	0.037	0.009	0.036
	28-Sep-2005	Corredor	3	0.010	0.002	neg.	0.002	0.000	0.012	0.004	0.002
RTP 3	23-May-2005	Corredor	3	0.015	0.005	0.000	0.016	0.006	0.017	0.023	0.011
	12-Sep-2005	Corredor	3	0.024	0.018	neg.	0.010	0.003	0.007	0.004	0.012
Eletrabus	28-Sep-2005	Corredor	3	0.004	0.003	neg.	0.003	neg.	0.007	neg.	0.007
<b>Metrobuses a Diesel</b>											
RTP	7-Sep-2005	Corredor	3	0.004	0.002	0.007	0.009	0.004	0.011	0.005	0.012
CISA	8-Sep-2005	Corredor	3	0.004	0.004	0.005	0.012	0.007	0.011	0.007	0.010
Fénix	9-Sep-2005	Corredor	3	0.015	0.008	0.002	0.019	0.005	0.004	neg.	0.006
<b>Autobuses a Gas Natural</b>											
Buscar	3-Feb-2005	Norte	1	0.033	-	0.057	-	0.002	-	0.015	-
	8-Jun-2005	Corredor	3	0.017	0.011	0.033	0.026	0.023	0.015	0.005	0.036
	3-Oct-2005	Corredor	0	0.005	0.002	0.002	0.002	0.003	0.005	neg.	0.005
FAW	4-Feb-2005	Norte	3	0.021	0.029	0.038	0.028	0.025	0.048	0.014	0.014
	4-Feb-2005	Corredor	2	0.036	0.006	0.058	0.011	0.017	0.003	0.001	0.014
	27-Jun-2005	Corredor	2	0.024	0.018	0.026	0.037	0.028	0.003	0.009	0.013
	4-Oct-2005	Corredor	3	0.012	0.001	0.007	0.010	neg.	0.006	neg.	0.000
	5-Feb-2005	Norte	3	0.022	0.003	0.040	0.015	0.016	0.035	0.022	0.039
ANKAI	5-Feb-2005	Corredor	3	0.018	0.012	0.025	0.004	0.035	0.015	0.046	0.022
	5-Oct-2005	Corredor	2	0.008	0.009	neg.	0.001	0.007	0.012	0.010	0.013
<b>Microbuses</b>											
M-LPG	24-Feb-2005	Norte	1	0.066	-	0.023	-	0.013	-	0.014	-
	24-Feb-2005	Corredor	2	0.071	0.020	0.028	0.018	0.009	0.012	0.006	0.002
	11-Nov-2005	Montevid	1	0.007	-	0.008	-	0.003	-	0.002	-
M-CNG	9-Mar-2005	Norte	2	0.050	0.030	0.002	0.003	0.004	0.006	0.000	0.000
	9-Mar-2005	Corredor	1	0.017	-	neg.	-	0.002	-	neg.	-
M-Gsln	10-Mar-2005	Norte	1	0.049	-	0.024	-	0.000	-	0.044	-
	10-Mar-2005	Corredor	2	0.068	0.089	0.022	0.008	0.025	0.036	0.003	0.004
M-D-CNG	3-Jun-2005	Corredor	2	0.010	0.001	0.009	0.040	0.019	0.007	neg.	0.005
	7-Oct-2005	Corredor	1	neg.	-	0.006	-	0.000	-	0.000	-
M-D-Gsln	6-Jun-2005	Corredor	3	0.004	0.004	0.005	0.012	0.008	0.007	0.002	0.004
	6-Oct-2005	Corredor	2	0.001	0.001	0.001	0.003	0.005	0.001	0.001	0.003

M-LPG: Microbús a gas L.P.

M-GNC: Microbús a gas natural comprimido GNC

M-Gsln: Microbús a gasolina

M-D-GNC: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

M-D-Gsln: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

**Tabla 13: Emisiones de Carbonilos (continuación)**

Vehículo	Fecha	Ruta de Manejo	Núm Tests	Emisiones de Aldehídos - g/km					
				Crotonald.		Butyrald.		Benzald.	
				Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$
<b>Autobuses a Diesel</b>									
RTP 1	26-May-2005	Corredor	3	0.023	0.017	0.011	0.048	0.022	0.012
	29-Sep-2005	Corredor	3	neg.	0.005	0.002	0.002	neg.	0.012
Vol 12	11-Feb-2005	Norte	3	0.042	0.072	neg.	0.132	neg.	0.067
	11-Feb-2005	Corredor	2	0.139	0.141	0.137	0.005	neg.	0.200
	13-Jun-2005	Corredor	1	0.048	-	0.078	-	0.050	-
	8-Oct-2005	Corredor	2	0.003	0.000	0.009	0.002	0.001	0.007
Sc 18	8-Feb-2005	Norte	3	0.033	0.029	0.038	0.101	0.092	0.056
	8-Feb-2005	Corredor	3	0.013	0.011	0.010	0.030	0.048	0.054
MB 11	24-Jun-2005	Corredor	3	0.040	0.034	0.009	0.001	0.019	0.020
	28-Sep-2005	Corredor	3	neg.	0.002	0.003	0.006	0.006	0.009
RTP 3	23-May-2005	Corredor	3	0.007	0.010	neg.	0.014	neg.	0.015
	12-Sep-2005	Corredor	3	0.006	0.008	0.001	0.016	0.009	0.017
Eletrabus	28-Sep-2005	Corredor	3	neg.	0.020	0.001	0.005	0.007	0.015
<b>Metrobuses a Diesel</b>									
RTP	7-Sep-2005	Corredor	3	0.004	0.006	0.002	0.004	0.011	0.021
CISA	8-Sep-2005	Corredor	3	0.012	0.011	neg.	0.003	0.006	0.008
Fénix	9-Sep-2005	Corredor	3	0.004	0.004	0.009	0.006	neg.	0.005
<b>Autobuses a Gas Natural</b>									
Busscar	3-Feb-2005	Norte	1	0.017	-	0.001	-	neg.	-
	8-Jun-2005	Corredor	3	0.010	0.020	0.018	0.010	0.028	0.034
	3-Oct-2005	Corredor	3	0.003	0.006	0.009	0.000	neg.	0.018
FAW	4-Feb-2005	Norte	3	0.030	0.040	0.022	0.029	0.042	0.027
	4-Feb-2005	Corredor	2	0.012	0.005	0.005	0.000	0.005	0.007
	27-Jun-2005	Corredor	2	neg.	0.008	0.029	0.017	0.033	0.000
	4-Oct-2005	Corredor	3	neg.	0.012	neg.	0.007	0.008	0.007
	5-Feb-2005	Norte	3	0.029	0.019	0.052	0.019	0.045	0.033
ANKAI	5-Feb-2005	Corredor	3	0.005	0.030	0.032	0.021	neg.	0.012
	5-Oct-2005	Corredor	2	0.006	0.009	neg.	0.003	0.004	0.001
<b>Microbuses</b>									
M-LPG	24-Feb-2005	Norte	1	0.010	-	0.005	-	0.004	-
	24-Feb-2005	Corredor	2	0.013	0.019	0.000	0.002	0.013	0.015
	11-Nov-2005	Montevid	1	0.003	-	0.008	-	0.005	-
M-CNG	9-Mar-2005	Norte	2	0.005	0.007	neg.	0.009	neg.	0.001
	9-Mar-2005	Corredor	1	0.000	-	neg.	-	0.013	-
M-Gsln	10-Mar-2005	Norte	1	0.017	-	0.028	-	0.028	-
	10-Mar-2005	Corredor	2	0.007	0.009	0.002	0.002	0.007	0.008
M-D-CNG	3-Jun-2005	Corredor	2	0.009	0.007	0.011	0.002	0.036	0.002
	7-Oct-2005	Corredor	1	neg.	-	neg.	-	neg.	-
M-D-Gsln	6-Jun-2005	Corredor	3	0.003	0.005	0.005	0.010	0.010	0.007
	6-Oct-2005	Corredor	2	0.000	0.002	0.002	0.001	0.004	0.001

M-LPG: Microbús a gas L.P.

M-GNC: Microbús a gas natural comprimido GNC

M-Gsln: Microbús a gasolina

M-D-GNC: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

M-D-Gsln: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

#### 4.4 ESPECIACIÓN DE EMISIONES COV

Como se mencionó antes, el equipo para medición de emisiones de carbonilos y COVs fue comprado más tarde que el resto del sistema RAVEM y no estuvo disponible en la primer parte de la primer campaña de muestreo. También errores del operador resultaron en datos inválidos para un número substancial de pruebas de análisis de cromatografía de gases durante la primera y segunda campañas, y para pruebas del metrobús tomadas a principio de la tercer campaña. Desafortunadamente, esto no fue descubierto hasta que las bolsas Tedlar, que contenían las muestras en cuestión, fueron purgadas. Por lo tanto, la mayor parte de los datos válidos de COV fueron recogidas durante la tercer campaña de muestreo. Los datos válidos de especiación de COV se encuentran resumidos en la Tabla 14, Tabla 15, y Tabla 16.

**Tabla 14: Especiación de emisiones de COV**

Vehículo	Fecha	Ruta de Manejo	Núm Tests	Emisiones de COV - g/km									
				Metano		Etano		Etileno		Propano		Propileno	
				Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$
<b>Autobuses a Diesel</b>													
RTP 1	30-Sep-05	Corredor	3	0.06	0.14	0.001	0.002	0.005	0.006	0.000	0.002	0.002	0.002
RTP 5	30-Jun-05	Norte	2	0.33	0.05	0.009	0.001	0.213	0.016	0.000	0.002	0.043	0.002
RTP 6	29-Jun-05	Corredor	2	0.05	0.04	0.001	0.000	0.029	0.000	0.004	0.007	0.007	0.000
Vol 12	11-Feb-05	Norte	2	neg.	0.03	0.000	0.000	0.027	0.002	0.000	0.000	0.006	0.000
	11-Feb-05	Corredor	2	0.37	0.37	0.003	0.003	0.040	0.040	0.009	0.009	0.010	0.010
	13-Jun-05	Corredor	1	neg.	-	0.000	-	0.016	-	0.000	-	0.005	-
MB 11	28-Sep-05	Corredor	2	0.03	0.01	0.000	0.000	0.010	0.002	neg.	0.000	0.002	0.000
Eletrabus	28-Sep-05	Corredor	2	0.33	0.05	0.009	0.001	0.213	0.016	0.000	0.002	0.043	0.002
<b>Autobuses a Gas Natural</b>													
Busscar	03-Feb-05	Norte	3	10.02	0.31	0.390	0.013	0.029	0.009	0.013	0.005	0.002	0.002
	03-Feb-05	Corredor	2	5.16	5.23	0.107	0.138	0.012	0.001	0.014	0.040	0.000	0.003
	08-Jun-05	Corredor	2	24.19	33.47	2.432	1.045	0.024	0.007	0.086	0.011	neg.	0.000
	03-Oct-05	Corredor	3	4.36	3.51	0.267	0.207	0.007	0.004	0.010	0.007	0.001	0.001
FAW	04-Feb-05	Norte	3	10.57	5.97	0.328	0.171	0.004	0.016	neg.	0.016	neg.	0.002
	27-Jun-05	Corredor	2	11.08	6.21	0.371	0.325	0.011	0.011	0.014	0.003	0.000	0.001
	04-Oct-05	Corredor	2	51.93	2.38	3.122	0.193	0.178	0.013	0.136	0.019	0.004	0.003
ANKAI	05-Oct-05	Corredor	2	8.25	5.11	0.462	0.356	0.022	0.012	0.015	0.012	0.001	0.001
<b>Microbuses</b>													
M-LPG	11-Nov-05	Montevid	1	0.25	-	0.071	-	0.240	-	2.772	-	0.170	-
	11-Nov-05	RTP-23	1	0.34	-	0.085	-	0.323	-	2.931	-	0.189	-
M-D-CNG	06-Jun-05	Corredor	2	0.80	0.52	0.050	0.028	0.002	0.000	0.002	0.002	neg.	0.001
	07-Oct-05	Corredor	1	4.60	-	0.237	-	0.043	-	0.009	-	0.008	-
M-D-Gsln	03-Jun-05	Corredor	2	0.13	0.32	0.026	0.019	0.125	0.124	neg.	0.007	0.026	0.047
	06-Oct-05	Corredor	2	0.65	0.70	0.037	0.035	0.329	0.297	0.007	0.009	0.084	0.072

M-LPG: Microbús a gas L.P.

M-GNC: Microbús a gas natural comprimido GNC

M-Gsln: Microbús a gasolina

M-D-GNC: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

M-D-Gsln: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

Como lo muestra la Tabla 14, los autobuses a gas natural, mostraron relativamente altas emisiones de metano – un importante gas de efecto invernadero, pero que prácticamente no muestra ninguna actividad en la formación de ozono urbano. Para estos autobuses, las emisiones de metano estuvieron en un rango de cinco a 50 gramos por kilómetro. Etano, otro COV de baja reactividad, contabilizó el grueso de las emisiones de COV restantes. Especies más reactivas como el etileno, propileno, etc., estuvieron presentes solo en muy bajas concentraciones, y fueron difíciles de distinguirse de los niveles ambientales o línea base. Las emisiones de COV metánicas y no metánicas del autobús FAW fueron mucho más elevadas en la segunda y tercer campañas que durante la primer campaña. Esto puede ser debido al cambio de calibración del motor y/o composición del combustible, resultando en una combustión incompleta o fuera de tiempo. Esto es algo común en motores de mezcla pobre a gas natural.

**Tabla 15: Especiación de emisiones de COV (continuación)**

Vehículo	Fecha	Ruta de Manejo	Núm Tests	Emisiones de COV - g/km									
				I-Butano		N-butano		Acetileno		Butanos		Pentanos	
				Avg.	$\Sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$
<b>Autobuses a Diesel</b>													
RTP 1	30-Sep-05	Corredor	3	0.00	0.00	neg.	0.001	0.001	0.005	0.001	0.001	neg.	0.001
RTP 5	30-Jun-05	Norte	2	neg.	0.00	neg.	0.000	0.105	0.015	0.013	0.000	neg.	0.006
RTP 6	29-Jun-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.001	0.001	0.007	0.010	0.002	0.001	neg.	0.004
Vol 12	11-Feb-05	Norte	2	0.00	0.00	neg.	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000
	11-Feb-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.003	0.003	0.000	0.000	0.009	0.009	0.003	0.003
	13-Jun-05	Corredor	1	neg.	-	0.000	-	0.000	-	0.003	-	0.000	-
MB 11	28-Sep-05	Corredor	2	neg.	0.00	0.000	0.000	0.006	0.001	0.001	0.001	neg.	0.000
Eletrabus	28-Sep-05	Corredor	2	neg.	0.00	neg.	0.000	0.105	0.015	0.013	0.000	neg.	0.006
<b>Autobuses a Gas Natural</b>													
Busscar	03-Feb-05	Norte	3	0.00	0.00	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002
	03-Feb-05	Corredor	2	neg.	0.00	0.004	0.014	0.018	0.005	neg.	0.000	neg.	0.009
	08-Jun-05	Corredor	2	0.01	0.00	0.012	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	neg.	0.011
	03-Oct-05	Corredor	3	0.00	0.00	0.001	0.001	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
FAW	04-Feb-05	Norte	3	neg.	0.00	neg.	0.004	neg.	0.020	neg.	0.001	neg.	0.018
	27-Jun-05	Corredor	2	0.00	0.00	neg.	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
	04-Oct-05	Corredor	2	0.01	0.00	0.010	0.003	0.000	0.000	neg.	0.000	0.002	0.002
ANKAI	05-Oct-05	Corredor	2	0.00	0.00	neg.	0.006	neg.	0.001	neg.	0.001	neg.	0.007
<b>Microbuses</b>													
M-LPG	11-Nov-05	Montevid	1	0.31	-	0.991	-	0.199	-	0.073	-	0.005	-
	11-Nov-05	RTP-23	1	0.33	-	1.035	-	0.300	-	0.070	-	0.000	-
M-D-CNG	06-Jun-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.001	0.002	neg.	0.035	neg.	0.002	0.001	0.023
	07-Oct-05	Corredor	1	0.00	-	0.001	-	0.000	-	0.005	-	0.002	-
M-D-Gsln	03-Jun-05	Corredor	2	0.08	0.11	0.029	0.035	0.644	0.901	0.372	0.354	neg.	0.064
	06-Oct-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.020	0.019	0.013	0.011	0.162	0.171	0.043	0.037

M-LPG: Microbús a gas L.P.

M-GNC: Microbús a gas natural comprimido GNC

M-Gsln: Microbús a gasolina

M-D-GNC: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

M-D-Gsln: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

Las emisiones de COV de todos los vehículos a diesel fueron extremadamente bajas, haciendo difícil su distinción de los niveles ambientales o línea base. Las emisiones más elevadas de COV, no metánicas, fueron medidas en el autobús de combustible dual (gasolina). Adicionalmente, a los relativamente altos niveles de etileno, butanos, pentenos y “otros” hidrocarburos, este vehículo mostró las emisiones más elevadas de 1,3 butadieno – un carcinógeno significativo. Esto es consistente con la observación común de que los motores de gasolina tienden a tener mucho más elevadas emisiones de COVs no metánicos que ya sea los motores a diesel o a GNC.

**Tabla 16: Especiación de emisiones de COV (conclusión)**

Vehículo	Fecha	Ruta de Manejo	Núm Tests	VOC Emissions - g/km							
				1,3 Butadieno		Pentenos		Otros HC		Total HCNM	
				Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$	Prom.	$\sigma$
<b>Autobuses a Diesel</b>											
RTP 1	30-Sep-05	Corredor	3	0.00	0.00	0.000	0.000	neg.	0.058	0.001	0.045
RTP 5	30-Jun-05	Norte	2	0.01	0.00	0.002	0.000	0.083	0.031	0.472	0.063
RTP 6	29-Jun-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.000	0.000	neg.	0.114	neg.	0.121
Vol 12	11-Feb-05	Norte	2	0.00	0.00	0.000	0.000	0.043	0.055	0.080	0.052
	11-Feb-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.002	0.002	neg.	neg.	0.029	0.029
	13-Jun-05	Corredor	1	0.00	-	0.000	-	0.026	-	0.051	-
MB 11	28-Sep-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.000	0.000	neg.	0.032	0.006	0.028
Eletrabus	28-Sep-05	Corredor	2	0.01	0.00	0.002	0.000	0.083	0.031	0.472	0.063
<b>Autobuses a Gas Natural</b>											
Busscar	03-Feb-05	Norte	3	0.00	0.00	0.000	0.000	0.007	0.007	0.447	0.037
	03-Feb-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.000	0.000	neg.	0.015	0.145	0.056
	08-Jun-05	Corredor	2	0.00	0.00	neg.	0.001	neg.	0.480	2.220	0.565
	03-Oct-05	Corredor	3	0.00	0.00	0.000	0.000	0.021	0.025	0.311	0.243
FAW	04-Feb-05	Norte	3	0.00	0.00	0.000	0.000	neg.	0.011	0.301	0.248
	27-Jun-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.000	0.000	0.003	0.000	0.401	0.339
	04-Oct-05	Corredor	2	0.00	0.00	0.000	0.000	0.006	0.001	3.469	0.234
ANKAI	05-Oct-05	Corredor	2	0.00	0.00	neg.	0.001	neg.	0.200	0.335	0.166
<b>Microbuses</b>											
M-LPG	11-Nov-05	Montevid	1	0.00	-	0.006	-	0.004	-	0.000	-
	11-Nov-05	RTP-23	1	0.00	-	0.001	-	neg.	-	neg.	-
M-D-CNG	06-Jun-05	Corredor	2	neg.	0.00	neg.	0.036	neg.	0.314	neg.	0.334
	07-Oct-05	Corredor	1	0.00	-	0.001	-	0.105	-	0.411	-
M-D-Gsln	03-Jun-05	Corredor	2	0.02	0.01	0.097	0.114	2.316	2.662	3.680	4.208
	06-Oct-05	Corredor	2	0.02	0.01	0.030	0.024	1.233	0.866	1.980	1.559

M-LPG: Microbús a gas L.P.

M-GNC: Microbús a gas natural comprimido GNC

M-Gsln: Microbús a gasolina

M-D-GNC: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

M-D-Gsln: Microbús combustible dual (gasolina y GNC)

#### 4.5 COMPARACIÓN CON DATOS DE LA UNIVERSIDAD DE WEST VIRGINIA

Ocho de los vehículos evaluados en este programa también fueron evaluados con el sistema de dinamómetro de chasis transportable de la Universidad de West Virginia (WVU). WVU evaluó los autobuses en cuatro ciclos de manejo, de los cuales tres fueron desarrollados específicamente para reflejar la operación de autobuses en la Ciudad de México. El ciclo WVU MX3 fue diseñado para simular la operación dentro del carril confinado, de manera similar a nuestra ruta Corredor Insurgentes, mientras que los ciclos MX1 y MX2 reflejan manejo urbano de baja velocidad y de alta velocidad, respectivamente. El último ciclo del WVU fue el ciclo europeo dinámico (ETC).

A pesar de que el ciclo MX3 fue diseñado para simular la operación del carril confinado, es sustancialmente más severo que la ruta Corredor Insurgentes que nosotros utilizamos. A pesar de que la velocidad promedio de los dos ciclos es similar, el ciclo de MX3 contiene 14 secuencias de paro-aceleración en 1,000 segundos (igual a 50 por hora), comparadas con sólo 30 paradas en la ruta Corredor Insurgentes. Los resultados del WVU MX3 y Corredor Insurgentes se muestran en la Tabla 17, y se grafican la una contra la otra en la Figura 10. Excepto por PM ambos grupos de medidas muestran patrones similares, pero los datos del Corredor Insurgentes del RAVEM son en promedio una tercera parte menores que los resultados del MX3, lo que es consistente con la mayor severidad de este último ciclo.

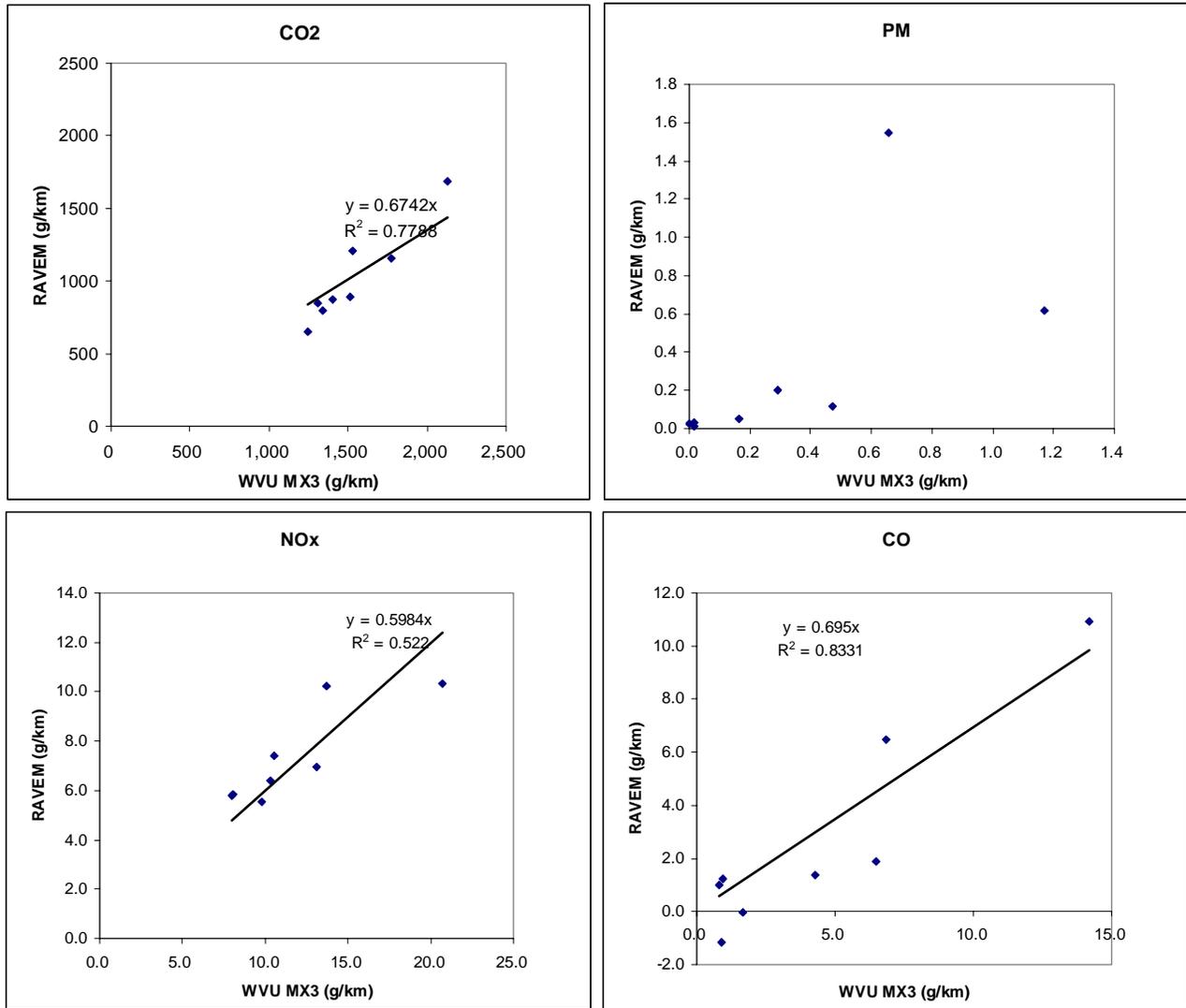
Las tendencias de PM se complican por grandes diferencias en las emisiones de PM de los vehículos MB 10 y Sc 18. En el caso del MB 10, las mediciones de PM del RAVEM son mucho menores que las del WVU, mientras que lo contrario se aplica en el caso del Sc 18. Las mediciones del RAVEM en el Sc 18 se tomaron el 18 de febrero, y las altas emisiones de PM observadas, se estima, son debido al mal funcionamiento del motor. Esto no es sorprendente, ya que las mediciones del WVU en noviembre del 2004 son sustancialmente menores. Las mediciones del RAVEM en el vehículo Sc 18 también fueron tomadas en noviembre del 2004, en paralelo con el sistema WVU y promediaron 0.41 g/km de PM.

En el caso del MB 10, las mediciones del WVU y del RAVEM se tomaron en días consecutivos, así es que es poco probable que la diferencia sea debido a algún cambio en la condición mecánica del motor. Por el contrario pareciera que las emisiones de PM del MB 10 pudieran ser altamente variables o muy sensitivas al ciclo de manejo. En el ciclo ETC las emisiones de PM medidas por el WVU del MB 10 son solo 0.09 g/km, que es solo una quinta parte de los niveles medidos en el ciclo MX3, y que es similar a las emisiones de PM medidas por el RAVEM.

**Tabla 17: Mediciones sobre el corredor de Insurgentes – RAVEM vs WVU MX3**

	PM (g/km)		NOx (g/km)		CO (g/km)	
	RAVEM	WVU	RAVEM	WVU	RAVEM	WVU
RTP 1	0.20	0.29	7.42	10.5	1.39	4.3
Vol 12	0.62	1.17	10.21	13.7	10.91	14.2
Sc 18	1.55	0.66	6.95	13.1	6.46	6.8
MB 10	0.11	0.47	5.79	8.0	1.88	6.5
RTP	0.05	0.16	6.39	10.3	1.00	0.8
Allison	0.03	0.02	5.82	8.0	Neg.	0.9
Busscar	0.01	0.02	5.52	9.8	Neg.	1.6
FAW	0.03	0.00	10.32	20.7	1.25	0.9
	CO2 (g/km)		THC (g/km)			
	RAVEM	WVU	RAVEM	WVU		
RTP 1	849	1,306	0.06	0.15		
Vol 12	887	1,514	0.03	0.18		
SC 18	1,685	2,128	na	0.07		
MB 10	651	1,245	na	0.02		
RTP 3	793	1,338	na	na		
Allison	1,203	1,527	na	na		
Busscar	876	1,402	5.30	8.41		
FAW	1,155	1,777	11.08	3.50		

**Figura 10: Mediciones en el corredor de Insurgentes – RAVEM vs WVU MX3**



## 5. MEDICIONES ADICIONALES: RUIDO Y OPACIDAD

Aunado a la medición de la masa de emisiones contaminantes de escape, este proyecto incluyó la medición de emisiones de ruido y opacidad de humo de escape. Este capítulo documenta los procedimientos de medición, así como, los resultados de estas emisiones.

### 5.1 RUIDO

#### 5.1.1 Procedimiento de Medición

La medición de emisiones de ruido se llevó a cabo de acuerdo con la NOM-080-ECOL-1994 e ISO 5130. Este procedimiento indica que el medidor de sonido, o micrófono deberá estar colocado a una altura igual al de la salida del tubo de escape, alejado 0.5 metros de la salida, y a un ángulo de 45° ( $\pm 10^\circ$ ) de la dirección de flujo de gas de escape. Entonces, se acelera el motor tres veces hasta corte de gobernador, y se registra el pico máximo de ruido durante la aceleración. El resultado de la prueba es el promedio de los valores de ruido mínimo y máximo durante la prueba. El estándar de ruido correspondiente establecido por la NOM-080-ECOL-1994 es 95 dB(a).

#### 5.1.2 Resultados

Los resultados de estas mediciones se resumen en la Tabla 18. Solo un vehículo – el Ankai – excedió el estándar de ruido. Los autobuses RTP 3 y Vol 12 fueron notablemente más silenciosos que el resto de los vehículos evaluados, los cuales mostraron resultados altamente concentrados en una banda de alrededor de 90 dB(A).

**Tabla 18: Resultados de Emisiones de Ruido**

Autobús	Combustible	Fecha	Medición de Ruido dB(A)			
			1	2	3	Prom.
RTP 3	D 50	23-Mayo	84.2	86.1	86.2	85.2
RTP 2	D 350	23-Mayo	91.0	91.2	90.8	91.1
RTP 4	D 350	23-Mayo	94.9	93.5	92.8	94.2
MB 11	D 15	16-Abril	89.3	87.3	90.3	89.8
Ankai	GNC	16-Abril	104.2	103.8	102.3	103.3
FAW	GNC	16-Abril	92.5	88.3	89.3	90.9
Busscar	GNC	16-Abril	87.9	87.5	87.0	87.7
MB 12	D 50	16-Abril	84.6	88.0	95.2	89.9
Vol 12	D 15	16-Abril	82.5	82.2	82.2	82.4
CISA	D 350	8-Sep	88.8	89.2	88.9	89.0
Fénix Metrobús	D 350	9-Sep	91.3	94.5	93.1	92.9
<b>Estándar mexicano</b>	<b>NOM-080-ECOL-1994</b>					<b>95</b>

## 5.2 OPACIDAD DE HUMO DE ESCAPE

### 5.2.1 Procedimiento de Medición

Las mediciones de humo se llevaron a cabo de acuerdo con las prácticas recomendadas del SAE-J-1667.

*“Antes de iniciar un ciclo de aceleración, el motor deberá estar en ralentí bajo normal. Desde esta posición, el operador deberá, tan rápido como le sea posible, mover el acelerador a la posición totalmente abierta. El operador deberá mantener el acelerador pisado a fondo hasta que el vehículo haya alcanzado la velocidad máxima gobernada, y mantener el acelerador en esa posición hasta que cuatro segundos adicionales hayan pasado. Después de este periodo, se deberá dejar de pisar el acelerador y el motor permitido a regresar a ralentí normal. El motor deberá permanecer en ralentí por al menos cinco segundos antes de comenzar la siguiente secuencia de aceleración. Esto permitirá que el turbocargador (en caso de existir) se desacelere a su velocidad normal durante ralentí normal, y permitirá mantener la repetibilidad entre ciclos de aceleración”*

El resultado del procedimiento de prueba SAE J1667, es el promedio de tres aceleraciones sucesivas. Para que la prueba sea válida, la diferencia entre los valores máximo y mínimo deberá ser de no más de cinco por ciento de opacidad – de otra manera se deberán realizar aceleraciones adicionales hasta que una secuencia de tres cumpla los requerimientos.

Todas las pruebas de opacidad se realizaron con un opacímetro *Wager 2500*, utilizando la cabeza sensor de flujo parcial. Esta cabeza tiene una “*path length*” de 5 pulgadas, ó 12.7 centímetros.

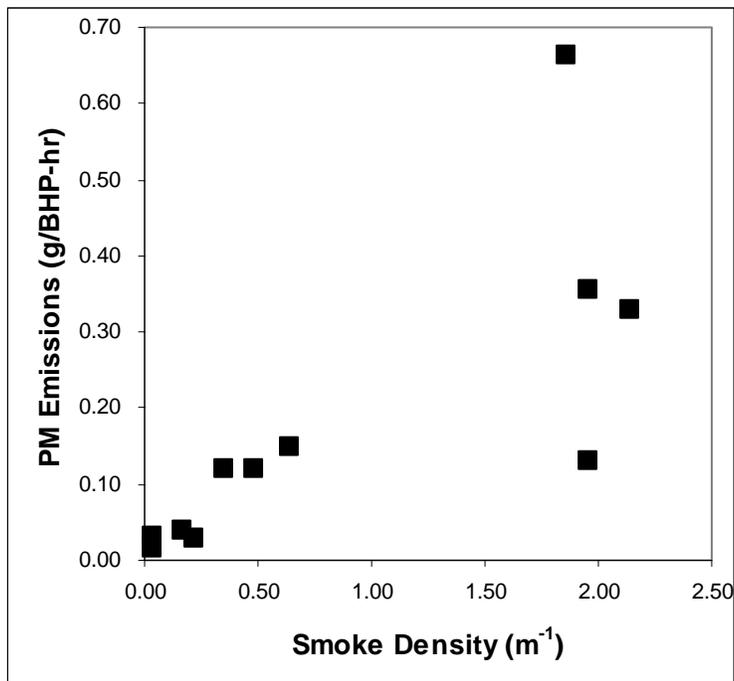
### 5.2.2 Resultados

Los resultados de las pruebas de opacidad se resumen en la Tabla 19. La tabla muestra la opacidad (medida sobre el “*path length*” de cinco pulgadas) y la correspondiente densidad de humo o valor “*K*” en la ley de Beer Lambert. Esto último es preferible para efectos de regulación, ya que es independiente del “*path length*”. Como la tabla muestra, todos los vehículos habrían cumplido con el límite de  $2.5 \text{ m}^{-1}$  requerida por la ECE R24.

También se muestra, en esa tabla, las emisiones de PM en gramos por BHP-hr, medidas para cada vehículo en la ruta *Insurgentes Norte*. La relación entre densidad de humo “*K*” y emisiones de masa de PM, se muestran en la Figura 11. Como la figura muestra, para estos grupos de autobuses, una elevada opacidad del humo en la prueba de aceleración libre generalmente está asociada a elevadas emisiones de PM en vehículos en uso, y viceversa. La prueba de aceleración libre puede entonces ser un buen indicador de las emisiones de autobuses en uso que para otro tipo de vehículos, ya que su operación está dominada por condiciones de paro-arranque.

**Tabla 19: Resultados de Mediciones de Opacidad con el procedimiento SAE J1667**

Vehículo	Fecha	% Opacidad	"K" m <sup>-1</sup>	PM g/BHP-hr
Allison	11-Nov-04	0.5	0.04	0.02
RTP 4	3-Dic-04	0.4	0.03	0.03
RTP 3	8-Dic-04	2.1	0.17	0.04
RTP 1	14-Dic-04	7.8	0.64	0.15
MB 10	16-Dic-04	4.3	0.35	0.12
SC 18	8-Feb-05	21.0	1.86	0.66
Vol 12	11-Feb-05	22.0	1.96	0.36
Eletrabus	20-Oct-05	2.8	0.22	0.03
RTP 2	3-Dic-05	5.9	0.48	0.12
CISA Metrobús	3-Dic-05	22.0	1.96	0.13
Fénix Metrobús	3-Dic-05	23.8	2.14	0.33

**Figura 11: Emisiones de PM “Brake-specific” vs. opacidad de humo**

## 6. CONCLUSIONES

Se llevaron a cabo pruebas de emisiones de escape, a bordo de 17 autobuses de año/modelo reciente, y cuatro microbuses, utilizando el Sistema Portátil de Medición de Emisiones Vehiculares, RAVEM. Los vehículos evaluados incluyen 12 autobuses convencionales a diesel, dos híbridos diesel-eléctricos, y tres motores “lean burn” a gas natural comprimido. Los cuatro microbuses incluyeron, uno a gasolina en motor estequiométrico, uno retroadaptado a gas L.P., uno retroadaptado a GNC, y uno dual retroadaptado para uso a GNC o gasolina. Dos autobuses a diesel y un híbrido diesel-eléctrico estaban equipados con trampas de partículas (DPF). Todos los autobuses a GNC y los microbuses estaban equipados con convertidores catalíticos.

La ruta de prueba fue un viaje redondo sobre Avenida de los Insurgentes en la Ciudad de México, del paradero de Indios Verdes a la Glorieta de Insurgentes y de regreso. La distancia total de la ruta fue de 21.4 kilómetros. Las pruebas se llevaron a cabo en dos condiciones de manejo, correspondiendo a tráfico normal durante el día, y a la simulación de operación en el corredor de autobuses libre de tráfico, tal como lo experimenta el metrobús. Los tiempos de prueba (incluyendo tiempo en ralentí al principio y final de la prueba) fue de 3,600 y 4,500 segundos respectivamente, correspondiendo a velocidades promedio de 17.1 y 21.4 kilómetros por hora.

Los contaminantes evaluados, incluyeron partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y carbonilos como formaldehído, acetaldehído, y acroleína. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) individuales como metano, etano, etileno, etc., fueron también medidos exitosamente en algunas pruebas.

La medición de emisiones de PM, de todos los autobuses a gas natural, y los microbuses de gas natural, combustible dual y a gas L.P., fueron extremadamente bajas – en rango de 0.01 a 0.04 gramos por kilómetro. Las emisiones de PM del microbús a gasolina fueron mucho más elevadas, de 0.16 a 0.22 gramos por kilómetro. El autobús híbrido a diesel, equipado con DPF estuvo en el mismo rango que los autobuses a gas natural, emitiendo 0.03 gramos de PM por kilómetro, mientras que los dos autobuses convencionales equipados con DPF, emitieron 0.01 a 0.08 gramos de PM por kilómetro. Cinco de los diez autobuses a diesel sin DPF exhibieron emisiones relativamente bajas de PM, los rangos se encontraron entre 0.07 a 0.28 gramos por kilómetro. Cuatro de estos autobuses estaban certificados bajo un procedimiento dinámico US EPA, la certificación del quinto autobús no estuvo disponible antes de la preparación de este informe. Dos autobuses certificados mediante el procedimiento estático Euro 3, exhibieron niveles mucho más elevados de emisiones de PM – 0.55 a 0.68 y 1.54 a 2.07 gramos por kilómetro, respectivamente. Las emisiones de PM reflejaron una fuerte correlación con la opacidad de humo, medida de acuerdo al procedimiento SAE J1667.

Las emisiones de NO<sub>x</sub> variaron de manera significativa entre los vehículos a diesel. Los dos autobuses híbridos mostraron respectivamente la segunda concentración más baja, y los niveles más altos de emisiones de NO<sub>x</sub> en este grupo. Debido a que la mayoría de los autobuses exhibieron emisiones de NO<sub>x</sub> mucho más elevadas de lo esperado, basados en los estándares de emisión aplicables para esos tipos de vehículos. Las emisiones de NO<sub>x</sub> en “brake-specific” se

estimaron con consumo de combustible, y su rango fue de 2.1 a 12.1 gramos por BHP-hr. Varios motores de autobús, supuestamente, certificados a estándares de emisión US EPA 1998 ó 2000, mostraron emisiones de NOx “brake-specific” de 30 a 80 por ciento arriba de estos estándares en condiciones de manejo en ruta. Un autobús mostró de manera inesperada, bajas emisiones de NOx “brake-specific”, pero también mostró las más altas emisiones de PM. Esto sugiere que el tiempo de inyección de combustible pudiera haber estado desajustado.

Las emisiones de CO de los motores a diesel y “lean-burn” a gas natural, fueron extremadamente bajas – yendo de pequeños valores negativos a menos de 6 gramos por kilómetro. Las emisiones de CO de los microbuses a GNC y gas L.P., fueron moderadamente altas, de 30 a 40, y alrededor de 80 gramos por kilómetro respectivamente. Las emisiones de CO del microbús a gasolina y del microbús de combustible dual, en modo a gasolina, fueron extremadamente altas, yendo de 147 a 362 gramos por kilómetro.

Los tres autobuses a GNC equipados con motores “lean-burn”, emitieron de 5 a 52 gramos de metano por kilómetro, alrededor de 0.1 a 3.1 gramos de etano, y niveles mucho más bajos de etileno e hidrocarburos más complejos. En modo a GNC, el microbús de combustible dual, emitió de 0.8 a 4.6 gramos por kilómetro de metano, 0.05 a 0.24 gramos por kilómetro de etano, y concentraciones muy bajas de hidrocarburos no metánicos. En modo a gasolina, sus emisiones de metano fueron aproximadamente 80% más bajas, pero sus emisiones no metánicas se incrementaron considerablemente – promediando 2 a 3.7 gramos por kilómetro. Las emisiones de COV de los autobuses a diesel fueron tan bajas que no se pudieron distinguir de manera confiable de los niveles de COV existentes en el ambiente.

El consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> entre los vehículos a diesel variaron de manera significativa con respecto del tamaño del vehículo, de alrededor de 200 gramos de combustible por kilómetro para el autobús ligero de 10 metros, a alrededor de 500 g/km para el autobús articulado de 18 metros. El consumo de masa de combustible de los autobuses a GNC fue similar a la obtenida por los autobuses a diesel del mismo tamaño. Los microbuses a GNC y gas L.P. usaron alrededor de 2/3 partes de combustible que los autobuses a diesel y GNC. El consumo de masa de combustible del minibús a gasolina fue sustancialmente mayor.

El consumo de combustible y emisiones durante manejo normal fue a veces más alto y a veces menor que en condiciones simuladas del carril confinado, dependiendo del vehículo y/o conductor. La ausencia de tráfico permitió que los conductores más agresivos manejaran más rápido y acelerarán más, con lo que se incrementó el consumo de combustible. El análisis estadístico de los seis vehículos con los datos más completos (de las tres campañas de muestreo) mostró una reducción promedio de consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> del 10% para los tres autobuses a diesel, cuando estos se operaron en condiciones de simulación del carril confinado, comparados con manejo normal. Para los tres autobuses a GNC, la reducción fue del 11%. Sin embargo, ningún valor fue estadísticamente significativo al nivel de confianza del 90%.

Ocho de los vehículos evaluados en este programa fueron también evaluados por el sistema de dinamómetro de chasis transportable, perteneciente a la *West Virginia University* (WVU). El ciclo MX3 de WVU, fue diseñado para simular la operación de un autobús en el corredor, de la misma manera que nuestra Ruta Corredor Insurgentes, en donde las velocidades promedio en ambos ciclos son similares. Sin embargo, el MX3 es más severo, con 50 paradas por hora comparado con 30 de la Ruta Corredor Insurgentes, lo que tendería a producir mayores emisiones

por kilómetro. Ambos sets de mediciones muestran tendencias similares, pero los datos del RAVEM en el Corredor de Insurgentes muestra en promedio 1/3 más bajos que los resultados del MX3 del WVU.

Se realizaron también algunas pruebas en dos autobuses Mercedes Benz 1991, uno de los cuales fue repotenciado con un motor que cumple con los estándares de emisión mexicanos existentes. Las emisiones de PM, CO, y NOx del autobús repotenciado fueron 88%, 86%, y 59%, más bajos respectivamente, que los encontrados en el autobús que no fue repotenciado. Por lo tanto, la repotenciación con motores modernos, con controles de emisión, pueden lograr reducciones importantes. Dicha repotenciación es posible en autobuses con motor trasero, pues los que tienen el motor en la parte frontal generalmente carecen de suficiente espacio para acomodar los accesorios de los motores mencionados.

## 7. REFERENCIAS

- <sup>1</sup> Weaver, C.S., M.V. Balam-Almanza, D. Noriega, R. Rodriguez, and L. Petty, "Medición de Emisiones a Vehículos Recolectores de Basura en la Ciudad De México" (Measurement of Emissions from Garbage Collection Vehicles in Mexico City), presented to the Interamerican Association for Sanitary Engineering, Cancún, Mexico, September 2002.
- <sup>2</sup> Weaver, C.S., L.M. Chan and L. Petty, Measurement of Air Pollutant Emissions From In-Service Passenger Ferries, report to the Water Transit Authority of San Francisco Bay, August, 2002.
- <sup>3</sup> C.S. Weaver and L.E. Petty "Reproducibility and Accuracy of On-Board Emission Measurements Using the RAVEM™ System ", SAE Paper No. 2004-01-0965, March, 2004.
- <sup>4</sup> Weaver, C.S. and M.V. Balam-Almanza, "Development of the 'RAVEM' Ride-Along Vehicle Emission Measurement System for Gaseous and Particulate Emissions", SAE Paper No. 2001-01-3644.
- <sup>5</sup> 40 CFR 86, Subpart N "Emission Regulations for New Otto-Cycle and Diesel Heavy-Duty Engines; Gaseous and Particulate Exhaust Test Procedures"
- <sup>6</sup> "California Exhaust Emission Standards and Test Procedures for 1985 and Subsequent Model Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles" as amended on February 26, 1999, California Air Resources Board
- <sup>7</sup> U.S. Patent No. 6,062,092. "System for Extracting Samples from a Stream", May 16, 2000.
- <sup>8</sup> Correlation between West Virginia University and Engine, Fuel and Emissions Engineering, Inc.'s RAVEM Emissions Measurements from Transit Buses, report under contract no. GDF-SMA-GEF-SC-027-04, Mechanical Engineering Dept., West Virginia University and Engine, Fuel, and Emissions Engineering, Inc., August, 2005.
- <sup>9</sup> M.L. Traver, C.J. Tennant, T.I. McDaniel, S.S. McConnel, B.K. Bailey, and H.Maldonado, "Interlaboratory Cross-Check of Heavy-Duty Vehicle Chassis Dynamometers", SAE Paper No. 2002-01-2879.
- <sup>10</sup> R. Hernández Kim, Director Comercial, Scania de México S.A. de C.V., carta a Dr. J. Victor Hugo Páramo, fechada el 23 de noviembre de 2005.
- <sup>11</sup> Yanowitz, J. ; Graboski, M.S. ; Ryan, L.B.A. ; Alleman, T.L. ; and McCormick, R.L. "Chassis dynamometer study of emissions from 21 in-use heavy-duty diesel vehicles" Environmental Science and Technology ; VOL. 33 ; ISSUE: 2 ; PBD: 15 Jan 1999.