

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA

Determinación de partículas en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) como contaminante criterio en la ciudad capital de Guatemala

Informe de Tesis

Presentado por

Edgar Antonio García del Pozo

Para optar al título de

Químico

Guatemala, julio de 2015

JUNTA DIRECTIVA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Decano: Dr. Rubén Dariel Velásquez Miranda

Secretaria: Licda. Elsa Julieta Salazar Meléndez de Ariza, M.A.

Vocal I: MSc. Miriam Carolina Guzmán Quilo

Vocal II: Dr. Sergio Alejandro Melgar Valladares

Vocal IV: Br. Michael Javier Mó Leal

Vocal V: Br. Blanqui Eunice Flores De León

AGRADECIMIENTO

A Dios	Por darme la vida y todo lo bueno de ella
A Juanita del Pozo	Por ser mi madre y darme su amor y apoyo siempre
A Humberto Aranda†	Por haber sido mi padre y ejemplo
A mi familia	Por compartir su vida con migo en todo momento
A Rodolfo Girón	Por su amistad y apoyo en todo momento de mi vida
A Jhoni Alvarez†	Por animarme y apoyarme en este trabajo de tesis
A Pablo Oliva	Por su apoyo en la realización de este trabajo de tesis
A Diana Pinagel	Por su contribución a mi desarrollo profesional
A la Facultad	Por inculcarme por medio de todos los catedráticos los conocimientos para desarrollarme como profesional

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis hijos, Jose Alejandro y Karla Paola que son la principal razón de ser de mi vida; a mi tía Julita† y a mi madre Juanita, de quienes siempre tuve todo su amor y me inculcaron el amor a Dios; a mis amigos, especialmente a Rodolfo Girón que desde hace muchos años ha sido un verdadero apoyo en mi vida. A la empresa Ecoquimsa que me brinda el medio para poder devolver a la sociedad guatemalteca lo que la universidad me ha enseñado.

ÍNDICE

<i>Contenido</i>	<i>Página</i>
1. RESUMEN	7
2. INTRODUCCIÓN	9
3. ANTECEDENTES	11
3.1 Bosquejo histórico del estudio de la contaminación ambiental	11
3.2 Material particulado	13
3.3 Efecto del material particulado a la salud y el medio ambiente	15
3.4 Reglamentación	23
3.5 Métodos de medición de partículas	26
3.6 Estudios desarrollados en Guatemala	30
4. JUSTIFICACIÓN	32
5. OBJETIVOS	34
5.1 Objetivo general	34
5.2 Objetivos específicos	34
6. HIPÓTESIS	35

7. MATERIALES Y MÉTODOS	36
7.1 Universo	36
7.2 Materiales	37
7.3 Método	38
8. RESULTADOS	42
9. DISCUSIÓN	47
10. CONCLUSIONES	51
11. RECOMENDACIONES	52
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
13. ANEXOS	55
13.1 Imágenes	55
13.2 Métodos de referencia aprobados por la EPA para PM _{2.5}	58
13.3 Manual de operación del equipo OMNI frm	64

INDICE DE IMÁGENES

1. Tipos de separadores de partículas tipo ciclón	28
2. Muestreadores de bajo volumen	29
3. Gráfica de resultados mensuales de PM _{2.5} durante el año 2012	44
4. Gráfica del promedio anual de PM _{2.5} durante el año 2012	45
5. Gráfica de comparación de las dos épocas del año	46
6. Muestreador de sólidos totales sedimentables	55
7. Muestreador de alto volumen	56
8. Muestreador en tiempo real de atenuación beta de C14	57
9. Muestreador en tiempo real tecnología TEOM	57

INDICE DE TABLAS

1. Guía de calidad del aire de la OMS para material particulado	24
2. Estándar de la norma de la EPA para PM _{2.5}	25
3. Resultados de promedio anual para PM ₁₀ (1996-2011) del Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia	31
4. Resultados la medición de PM ₁₀ del año 2011 del Laboratorio de Monitoreo de Aire de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia	31
5. Resultados de las mediciones de PM _{2.5} durante el año 2012	42
6. Resumen mensual de las mediciones de PM _{2.5} durante el año 2012	44
7. Resumen del promedio aritmético anual de las mediciones de PM _{2.5} durante el año 2012	45
8. Resumen del promedio aritmético de las mediciones de PM _{2.5} por estación climática del año 2012	46

1. RESUMEN

Actualmente la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, por medio del Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química, realiza monitoreo del aire en cuatro puntos de la capital de Guatemala. Entre los parámetros que se analizan está el material particulado en su fracción menor a 10 micrómetros. Este tamaño de partícula está incluido en el listado de la Organización Mundial de la Salud (OMS) como un contaminante criterio. Sin embargo, el material particulado más pequeño presenta más riesgo para la salud de los seres humanos, por tal razón la OMS ha establecido también la medición regular de la concentración de material particulado menor a 2.5 micrómetros (Organización Mundial de la Salud, 2005).

El objetivo principal de este trabajo de tesis fue realizar el primer monitoreo de material particulado menor a 2.5 micrómetros en la ciudad de Guatemala y así determinar si los niveles se encuentran por debajo del valor guía de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que la OMS ha establecido para un promedio anual, para que los países puedan definir sus políticas de reducción de material particulado en el ambiente.

Para el cumplimiento de este objetivo, se trabajó en conjunto con el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química con el apoyo de una empresa privada guatemalteca, los cuales brindaron el apoyo logístico y material para poder realizar los monitoreos en cuatro puntos de medición establecidos, ubicados en: el Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá (INCAP), en la zona 11; el Museo de la Universidad San Carlos (MUSAC), en la zona 1; en el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), en la zona 13 y en el edificio T-10 de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC, zona 12. El monitoreo de las partículas $\text{PM}_{2.5}$ se realizó por 24 horas en cada uno de los puntos indicados, durante los doce meses del año 2012.

Para la medición se estableció un protocolo similar al que el Laboratorio de Monitoreo del Aire ya tenía establecido para PM_{10} y se escribió el procedimiento

para la toma de la muestra de material particulado $PM_{2.5}$, utilizando un equipo marca BGI Incorporated, modelo OMNI ftr, de bajo volumen.

Se recopilaron y tabularon los resultados de todas las mediciones del año, se determinó el promedio anual por punto de monitoreo, se calculó el promedio en los meses de lluvia y en los meses de época seca y se compararon los resultados con los obtenidos del monitoreo de PM_{10} . Los resultados obtenidos indican que en los cuatro puntos monitoreados la concentración anual promedio de material particulado $PM_{2.5}$, excede los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, establecidos por la OMS como valor guía. Tres de los puntos monitoreados presentaron, durante todos los meses del año, valores mayores a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor establecido por la OMS como valor guía para 24 horas de medición. Uno de los puntos presentó durante todos los monitoreos mensuales un valor menor a los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

De acuerdo a los resultados obtenidos se comprueba la hipótesis de que el promedio anual de material particulado $PM_{2.5}$ se encuentra por arriba del valor guía indicado por la OMS. Los valores obtenidos muestran que es necesario implementar de forma regular este parámetro de medición y que debe darse el apoyo al Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química, para realizarlo. Es importante ampliar la red de monitoreo del aire para poder determinar un perfil más amplio de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala y poder establecer un modelo de dispersión que permita predecir la contaminación en toda el área metropolitana de Guatemala.

2. INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación ambiental no es ajeno a nuestro país, cada vez hay más vehículos automotores, fábricas, quema de basura, etc., que afectan la calidad del aire que respiramos. En algunas de las zonas más congestionadas por vehículos de la ciudad de Guatemala, se puede notar a simple vista cómo se depositan en las casas y el suelo, las partículas generadas por los sistemas de combustión. De esta misma forma estas partículas pueden depositarse en el sistema respiratorio de los seres humanos, animales y en las plantas.

Las partículas en suspensión pueden caracterizarse de acuerdo a su tamaño, y la importancia de esta división estriba en el daño que pueden ocasionar al organismo humano. De allí que entidades como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA – por sus siglas en inglés), desde hace muchos años se han preocupado por monitorear la calidad del aire y han establecido valores guía con fines epidemiológicos para establecer los niveles que son dañinos para la salud del ser humano. En estas guías se contempla a las partículas en suspensión en su fracción menor a 10 micrómetros y las partículas en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros.

La importancia de la determinación de las partículas suspendidas en la fracción menor a 2.5 micrómetros es que estas por su tamaño pueden penetrar más en el sistema respiratorio, hasta el punto de poder intervenir directamente en el intercambio gaseoso con la sangre en los alveolos pulmonares, provocando no solo problemas del sistema respiratorio sino también problemas cardíacos; siendo los más afectados los niños pequeños y los ancianos.

En Guatemala, el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, determina desde hace varios años el contenido de partículas en suspensión en su fracción de 10 micrómetros. Es

necesario incluir en el programa de monitoreo las partículas en su fracción de 2.5 micrómetros, para esto se cuenta con el apoyo de un laboratorio privado que brindará el equipo necesario para el trabajo de toma de muestra. De esta forma se podrá determinar que fracción de las partículas ya analizadas por el laboratorio de monitoreo del aire se encuentra en su fracción menor a 2.5 micrómetros. Esto permitirá determinar el nivel de contaminación en los puntos ya establecidos en la ciudad de Guatemala, de acuerdo a su comparación con las guías de calidad del aire de la OMS.

Para la implementación de la metodología de monitoreo de partículas en su fracción de 2.5 micrómetros se elaborará un procedimiento de monitoreo en base al manual de equipo que se utilizará y al procedimiento de referencia de la EPA.

3. ANTECEDENTES

3.1 Bosquejo histórico del estudio de la contaminación ambiental

La contaminación del aire ha sido un problema de salud pública desde el descubrimiento del fuego. En la antigüedad, las personas encendían fogatas en sus cuevas y cabañas y frecuentemente contaminaban el aire con humo nocivo. El filósofo romano Séneca escribió sobre el "aire cargado de Roma" en el año 61 A.C. En algún momento de la historia se consideró que la contaminación del aire era mas una molestia que una amenaza para la salud humana, sin embargo ya en 1306 se promulgaron algunas leyes para prevenir la contaminación del aire. Por ejemplo, en ese año, Eduardo I prohibió la quema de carbón en los hornos artesanos debido a los "gases hediondos" que se producían; siglos después Elizabeth I prohibió, por similares razones y estéticas, la quema de carbón en Londres. Con el transcurso de los años la contaminación del aire empeoró, pero aún no se le reconocía como una amenaza para la salud del hombre, y los esfuerzos de control se referían a los efectos estéticos más que al bienestar de las personas. El origen de nuestros problemas modernos de contaminación del aire puede remontarse a la Inglaterra del siglo XVIII y al nacimiento de la revolución industrial. La industrialización comenzó a reemplazar las actividades agrícolas manuales, y las poblaciones se desplazaron del campo a la ciudad. Las fábricas para producir requerían energía que se lograba mediante la quema de combustibles fósiles, tales como el carbón y el petróleo. El principal problema de contaminación del aire a fines del siglo XIX e inicios del siglo XX fue el humo y ceniza producidos por la quema de combustibles fósiles en las plantas estacionarias de energía. La situación empeoró con el creciente uso del automóvil. Para entonces ya se promulgaron muchas ordenanzas para el control del humo en Inglaterra y Estados Unidos. Con el tiempo, se presentaron episodios importantes de salud pública a causa de la contaminación del aire en ciudades como Londres, Inglaterra y Los Ángeles, Estados Unidos (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

Desde 1957, a raíz de una conferencia en Milán sobre los aspectos de salud pública relacionados con la contaminación del aire en Europa, la Organización Mundial de la Salud (OMS) se ha preocupado por este tema, especialmente por sus efectos sobre la salud. En 1965, el Consejo Directivo de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) recomendó a su Director el establecimiento de programas de investigación de la contaminación del agua y del aire con el objeto de colaborar con los Gobiernos Miembros en el desarrollo de políticas adecuadas de control. Cuando la OPS creó en 1967 su programa regional de estaciones de muestreo de la contaminación del aire, ningún país conocía la magnitud real de sus problemas de contaminación atmosférica. Con esta iniciativa, a través del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), que iniciaba sus actividades, la OPS estableció la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire (REDPANAIRE). REDPANAIRE comenzó con ocho estaciones y hacia fines de 1973, ya contaba con un total de 88 estaciones distribuidas en 26 ciudades de 14 países. En 1980, REDPANAIRE discontinuó sus actividades y formó parte del Programa Global de Monitoreo de la Calidad del Aire, establecido en 1976 por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), como parte del Sistema Mundial de Monitoreo del Medio Ambiente (GEMS por sus siglas en inglés). En 1990, el ex Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud (ECO) de la OPS realizó una encuesta sobre el estado de los programas de calidad del aire en América Latina y el Caribe. Los resultados de esta encuesta indicaron que sólo seis países habían establecido estándares de calidad del aire, diez habían desarrollado redes de monitoreo de la calidad del aire, nueve habían preparado inventarios de emisiones, cuatro habían establecido estrategias de control y cuatro habían llevado a cabo estudios epidemiológicos (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

Durante la década de los noventa, la OMS organizó el Sistema de Información sobre la Gestión de la Calidad del Aire (AMIS por sus siglas en inglés) que tiene presencia en el nivel mundial. En 1997, el programa GEMS se incorporó al AMIS.

Actualmente, el AMIS brinda la información global requerida para el manejo racional de la calidad del aire que incluye el monitoreo de la concentración de contaminantes del aire, desarrollo de instrumentos para elaborar inventarios de emisiones y modelos de calidad del aire, estimación de los efectos sobre la salud pública a través de estudios epidemiológicos y la propuesta de planes de acción detallados para mejorar la calidad del aire. La participación en el AMIS vincula automáticamente a los países con una red de apoyo que cuenta con recursos y experiencia (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

3.2 Material particulado

Material particulado, es el término genérico para una amplia clase de sustancias químicamente y físicamente diversas que existen como objetos discretos (gotas muy pequeñas de líquidos o sólidos) en una amplia gama de tamaños. Las partículas provienen de una variedad de fuentes antropogénicas fijas y móviles, así como de fuentes naturales. Las partículas pueden ser emitidas directamente o por las transformaciones de las emisiones de gases como el dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC) que se forman en la atmósfera. Las propiedades químicas y físicas del material particulado varían enormemente con el tiempo, la región, la meteorología y la categoría de la fuente, lo que complica la evaluación de los efectos en la salud y bienestar (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

El material particulado puede dividirse en (y actualmente está regulado bajo) dos rangos de tamaño: $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} . El $\text{PM}_{2.5}$ denota partículas \leq de 2.5 micrómetros (μm) de diámetro. El PM_{10} son aquellas partículas con diámetros \leq de 10 μm . El $\text{PM}_{2.5}$ incluye las llamadas partículas ultrafinas: partículas inferiores a

aproximadamente 0.1 micrómetros de diámetro (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

La medición de las $PM_{2.5}$ incluyendo, las partículas ultrafinas, es particularmente importante para la salud humana, pues con un ancho veinte veces menor que un cabello humano, estas partículas finas pueden ser inhaladas profundamente en la región de intercambio gaseoso en el pulmón (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

Se le conoce también como partículas "gruesas", a las que abarcan el rango de aproximadamente 2.5 a 10 micrómetros de diámetro, éstas también causan efectos adversos para la salud. Algunas de estas partículas gruesas se generan naturalmente por la brisa marina, el viento, la erosión, polvo volcánico, viento del suelo y polen. También son producidas por actividades humanas como la construcción, demolición, minería, polvo de la carretera, desgaste de neumáticos y procesos industriales que impliquen la molienda y trituración de rocas o metales. Las partículas gruesas tienden a asentarse más rápidamente que las partículas finas y por lo general se encuentran relativamente cerca de su fuente. Las partículas finas, en cambio, pueden ser transportadas largas distancias por el viento y los cambios en el ambiente, pudiendo viajar cientos de millas de donde fueron formadas (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

La concentración y la composición de la contaminación de partículas en la atmósfera varían según la época del año y ubicación, y se ven afectadas por varios aspectos de las condiciones meteorológicas, como la temperatura, humedad y viento. El carbono es un componente importante de $PM_{2.5}$ en todas partes del mundo, forma parte del "humo negro" y se han observado las altas concentraciones de este material cerca de las carreteras principales y secundarias (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

3.3 Efecto del material particulado a la salud y el medio ambiente

Las partículas transportadas por el aire se han asociado con efectos adversos sobre la salud humana desde principios de siglo XX. De hecho, los episodios de la contaminación aguda por partículas que tuvieron lugar hace décadas en diferentes partes del mundo impulsaron el desarrollo de muchas de las primeras directrices de la contaminación del aire. Durante estos episodios --- incluso en el valle de Mosa en Bélgica en 1930; Donora, Pennsylvania, en 1948; y Londres, Inglaterra, en 1952--- niveles extremadamente altos de partículas se asociaron con un aumento dramático en la mortalidad diaria. En Donora, 20 residentes murieron y 7,000 personas, la mitad la población, fueron hospitalizadas con dificultades respiratorias debido a una mezcla venenosa de partículas aerotransportadas y gases desde las chimeneas de la fundición de zinc local y de otras fuentes. Esta tragedia, en particular, sorprendió a los Estados Unidos y marcó un punto de partida para los estudios sobre la contaminación del aire y sus efectos sobre la salud humana (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

Numerosos estudios han vinculado la contaminación del aire por material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) a una amplia gama de daños a la salud cardiovascular y respiratoria. Estudios recientes reportan una estrecha relación entre la exposición a corto plazo a diversos indicadores de material particulado y mortalidad cardiopulmonar, hospitalización y visitas a servicio de emergencia y problemas respiratorios. Ahora hay pruebas para su asociación con consecuencias a la salud cardiovascular, tales como ataques cardíacos y cambios en la química sanguínea. Los niños y los ancianos, así como personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias preexistentes, como el asma, son particularmente susceptibles a efectos de salud causados por el material particulado. El material particulado es también un mecanismo de entrega efectiva de otros contaminantes tóxicos, que se adhieren a partículas transportadas por el aire. Estos productos tóxicos son entonces transportados a los pulmones donde pueden ser absorbidos por la sangre y tejidos (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

El riesgo a la salud de inhalar material particulado depende del tamaño y características de las de partículas. El tamaño determina cuán profundamente las partículas inhaladas pueden penetrar en las vías respiratorias, donde persisten y pueden causar daños respiratorios severos. En general, sólo partículas iguales o inferiores a 10 micrómetros de diámetro (la fracción de PM_{10}) pueden ser inhaladas profundamente en los pulmones sin que antes sean interceptadas por la nariz o la faringe. Las partículas más finas (la fracción de $PM_{2.5}$), depositadas en la región alveolar, pueden permanecer en los pulmones durante largos períodos de tiempo porque los alveolos carecen del sistema de protección revestido de moco de la tráquea y bronquios. Esto presenta una preocupación especial porque es en los alveolos donde se realiza intercambio de oxígeno a la sangre (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Cuando un material extraño llega a las células del pulmón, los macrófagos (glóbulos blancos que residen en los tejidos y espacios aéreos del pulmón) y otras células protectoras, responden a la amenaza tratando de envolver, degradar y en última instancia expulsar al invasor. Los mecanismos biológicos precisos que conducen a efectos adversos para la salud no han sido bien definidos, aunque las observaciones experimentales han sugerido varias hipótesis. El ingreso de partículas en el pulmón con frecuencia se traducirá en una respuesta inflamatoria, que puede producir daño celular. Las partículas también pueden estimular las células nerviosas en el tejido subyacente, que a su vez puede afectar el sistema nervioso y su control en la respiración, la frecuencia cardíaca y la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Las partículas ultrafinas pueden entrar el torrente sanguíneo y ser transportadas al hígado, médula ósea y el corazón, y provocar efectos directos o indirectos en la función del órgano. Los investigadores han sugerido que varias respuestas fisiológicas podrían producirse en coordinación para producir efectos de la salud (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

De acuerdo con la EPA, una exposición a corto plazo (horas o días) a las PM_{2.5} y PM₁₀ puede provocar una enfermedad pulmonar, causando ataques de asma, bronquitis aguda, y puede también provocar aumento de la susceptibilidad a infecciones respiratorias. En personas con enfermedades del corazón, las exposiciones a corto plazo se han vinculado a ataques cardíacos y arritmias. En niños sanos y adultos no se ha reportado que sufran graves efectos de las exposiciones de corto plazo, aunque pueden experimentar irritación menor temporal cuando los niveles de partículas son elevados (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

La contaminación de partículas de aire provoca un mayor uso de los medicamentos de asma, aumento de las tasas de ausentismo escolar, aumento de visitas a salas de emergencias y hospitalizaciones. Otros efectos adversos pueden incluir tos y dificultad de respiración. Aumentos de corto plazo en los niveles del material particulado se han relacionado con:

- muerte por causas respiratorias y cardiovasculares
- aumento del número de ataques al corazón, especialmente entre las personas mayores y personas con enfermedades del corazón
- inflamación del tejido pulmonar en adultos jóvenes y sanos
- mayor hospitalización por enfermedades cardiovasculares
- aumento de visitas a la sala de emergencia de pacientes que sufren de dolencias respiratorias agudas
- aumentó de hospitalización de niños con asma
- aumento de la severidad de los ataques de asma en los niños (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006)

Desde principios de los años noventa docenas de estudios del efecto de la exposición a material particulado a corto plazo y su repercusión en la salud se han realizado a lo largo de los Estados Unidos y alrededor del mundo. Los resultados

siempre indican que los aumentos en la exposición a corto plazo de la contaminación de partículas están asociados con los efectos adversos para la salud descritos anteriormente (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

El estudio nacional de mortalidad y contaminación de aire de los Estados Unidos, es el análisis más extenso de los efectos a corto plazo de la contaminación del aire con material particulado en la salud humana. El estudio incluye los efectos sobre la mortalidad en 90 ciudades de los Estados Unidos. Análisis adicionales, más detallados, se llevaron a cabo en las 20 ciudades más grandes de los Estados Unidos (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

El estudio utiliza una metodología uniforme para evaluar la relación entre la mortalidad y el material particulado para las diferentes ciudades y sintetiza los resultados para proporcionar una estimación combinada de efectos a través de las ciudades. Los autores reportan significantes asociaciones estadísticas entre la mortalidad cardiorespiratoria y la mortalidad por cualquier otra causa; y las concentraciones de material particulado. El riesgo estimado de muertes por causas cardiorrespiratorias fue mayor que el estimado de las muertes por todas las causas (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Entre otros, un estudio importante fue el realizado en el 2004 por la Asociación Estadounidense del Corazón. En dicho estudio se ha llevado a cabo una amplia revisión de la literatura médica sobre los efectos a la salud de la contaminación de partículas y emitió una declaración a finales del 2004 en la que expone que la contaminación del aire por $PM_{2.5}$ contribuye al desarrollo de enfermedades cardiovasculares. Aunque el incremento en el riesgo de la enfermedad cardíaca asociado a las $PM_{2.5}$ para un individuo fue considerado bajo en comparación con el impacto de otros factores de riesgo cardiovascular como la alta presión arterial y el colesterol alto, las $PM_{2.5}$ fueron identificadas como un problema grave de salud

pública debido al gran número de personas afectadas y porque la exposición se produce durante toda la vida (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Una exposición a largo plazo, como la que experimentan las personas que viven durante años en zonas con altos niveles de material particulado, se ha asociado con problemas como la función pulmonar reducida y el desarrollo de la bronquitis crónica e incluso una muerte prematura. Otro rango de síntomas entre nacimientos prematuros y graves trastornos respiratorios, se han determinado cuando los niveles de partículas son bajos. Un año de exposición a la contaminación por partículas se ha relacionado con:

- Disminución en el crecimiento de la función pulmonar en niños y adolescentes
- Daño significativo a las pequeñas de vías respiratorias de los pulmones
- Aumento del riesgo de muerte por cáncer de pulmón
- Aumento del riesgo de muerte por enfermedad cardiovascular (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Tres importantes estudios de los efectos crónicos de la exposición a las $PM_{2.5}$ han vinculado al aumento en la mortalidad con la exposición a largo plazo a este material particulado: los estudios de seis ciudades realizados por la American Cancer Society (ACS) y la Iglesia Adventista del séptimo día (AHSMOG) de California (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Posteriores estudios realizados en el 2000 por la ACS en las mismas seis ciudades, confirmaron los hallazgos del primer estudio, sugieren una asociación de la exposición a largo plazo con las $PM_{2.5}$ y la mortalidad total y cardiorespiratoria. Los investigadores han realizado un análisis extenso utilizando métodos estadísticos alternativos y examinando la función de 20 factores potenciales (como

otros contaminantes, efecto del clima y factores socioeconómicos por ejemplo) sobre los resultados del estudio. El estudio identificó el estatus de educación superior como un factor asociado con la disminución del riesgo a la exposición de la contaminación del aire y reportó una asociación entre la contaminación de SO₂ y mortalidad (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

El análisis del estudio de cohorte de la ACS encontró asociaciones significativas entre la exposición a largo plazo a las partículas finas (usando varios periodos promedios para las concentraciones de calidad de aire) y de la mortalidad prematura por todas las causas, las enfermedades cardiopulmonares y el cáncer de pulmón. En el re-análisis y análisis extendido del estudio de cohorte de ACS, la exposición a largo plazo a las fracciones de tamaño de material particulado entre 2.5 y 10 µm no fue significativamente asociado con la mortalidad. Para la EPA, de todos los estudios de exposición a largo plazo, son de mayor peso los estudios de las seis ciudades de la ACS debido a los datos y las metodologías utilizadas (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Los individuos con enfermedad cardíaca o pulmonar, adultos mayores y los niños se consideran las personas de mayor riesgo, especialmente cuando son físicamente activas. La actividad física provoca en los individuos a respirar con mayor rapidez y más profundamente, provocando que mayor cantidad de partículas entre en sus pulmones. Las personas con enfermedad cardíaca o pulmonar (tales como la enfermedad coronaria, la insuficiencia cardíaca congestiva, el asma o la enfermedad pulmonar obstructiva crónica) están en mayor riesgo porque partículas pueden agravar estas enfermedades. Personas con diabetes también pueden estar en mayor riesgo porque tienen más probabilidades de tener subyacentes enfermedades cardiovasculares (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Adultos mayores están en mayor riesgo que los jóvenes, quizás debido al corazón sin diagnosticar enfermedad pulmonar o diabetes. Muchos estudios muestran que cuando los niveles de partículas son altos, los adultos mayores tienen más probabilidades de ser hospitalizados y morir de enfermedad del corazón o pulmón agravada. Los niños corren mayor riesgo a la exposición al material particulado por varias razones: aún están en el desarrollo de sus pulmones; pasan más tiempo en altos niveles de actividad; y tienen más probabilidades de tener asma o enfermedades respiratorias agudas (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Los riesgos asociados con la exposición de material particulado varían a lo largo de toda la vida y es generalmente más alto en la primera infancia, inferior en la adolescencia saludable y la edad adulta joven y superior nuevamente en la vejez debido a enfermedades del corazón y pulmón, y a la diabetes. Factores que aumentan el riesgo de ataque al corazón, tales como presión arterial alta y niveles de colesterol elevados, también pueden aumentar el riesgo asociado con la exposición de partículas. Además, los científicos están evaluando nuevos estudios que sugieren que la exposición a altos niveles de partículas puede estar asociada con bajo peso al nacer en los bebés, nacimientos prematuros y, posiblemente, muertes fetales e infantiles (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

En cuanto al medio ambiente, las partículas provocan una severa disminución de la visibilidad. Las partículas reducen la capacidad de observar colores, claridad y contraste de los objetos a la distancia. Estudios han revelado que en algunas partes de Estados Unidos, la contaminación ha reducido el rango visual en un 70 % de las condiciones naturales. Además de que afectan a la visibilidad, las partículas aerotransportadas también pueden producir daños en los ecosistemas. El efecto más significativo al ecosistema, relacionado con las partículas, se da cuando el depósito acumulado a largo plazo de nitratos y sulfatos supera su capacidad de

almacenamiento o su capacidad buffer natural. Esto, afecta el estado de los nutrientes del ecosistema y cambia indirectamente la química del suelo, las poblaciones de bacterias implicadas en el ciclo de los nutrientes y las poblaciones de hongos, afectando la absorción de nutrientes de las plantas. El nitrógeno y azufre en cantidades variables son nutrientes necesarios y beneficios para la mayoría de los organismos. Sin embargo, cantidades excesivas de estos nutrientes provenientes de la deposición atmosférica pueden conducir a cambios no deseados en los ecosistemas tales como desplazamiento de especies, pérdida de la diversidad de especies, y afectar a especies amenazadas y en peligro de extinción (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

Además de alterar la química de los ecosistemas, la contaminación de partículas también causa daños directamente a la vegetación. Experimentos en cultivos de plantas y árboles han demostrado el daño que puede causar a la estructura de la superficie de las hojas la exposición a lluvia ácida simulada o niebla ácida (principalmente como resultado de material particulado precursor de SO_2 y NO_x) en niveles de pH de 3.5. Las ceras epicuticulares, que tienen la función de evitar la pérdida de agua de las hojas de la planta, pueden ser destruidas por la lluvia ácida en pocas semanas. El buen funcionamiento de la cera epicuticular en las coníferas es especialmente crucial debido a su longevidad y follaje siempre verde. La sensibilidad de las plantas a la precipitación ácida (lluvia o niebla) varía de una especie a otra. Otros efectos directos a árboles forestales por la precipitación ácida incluyen: mayor permeabilidad de superficies de las hojas a materiales tóxicos, agua y agentes patógenos; aumento de la lixiviación de nutrientes en el follaje, y alteración en los procesos reproductivos. Todos estos efectos debilitan a los árboles y los dejan más susceptibles a otras factores externos (por ejemplo, cambios climáticos extremos, las plagas y patógenos) (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006) (Manual Merck de Información Médica para el Hogar, 2013).

El material particulado en el aire también puede ensuciar, decolorar y causar daños a otros materiales como cemento o piedra caliza, superficies de metal, superficies pintadas, equipo electrónico, estructuras de madera, etc. La degradación química de estos materiales se produce especialmente por el efecto ácido de las partículas (State and Territorial Air Pollution Program Administrators, 2006).

3.4 Reglamentación

Las guías de la calidad del aire establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) tienen por objeto ofrecer orientación sobre la manera de reducir los efectos de la contaminación del aire en la salud. Estas guías, fueron publicadas por primera vez en 1987 y actualizadas en 1997, y se basaban en la evaluación por expertos de las pruebas científicas de aquel momento. Luego, dada la abundancia de nuevos estudios sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud que se fueron incorporado a la bibliografía científica desde la conclusión de la segunda edición de la publicación de las Guías de calidad del aire para Europa, y en particular las investigaciones en los países de ingresos bajos y medianos, donde la contaminación del aire alcanza su nivel máximo, la OMS realizó los estudios las pruebas científicas acumuladas y examinó sus repercusiones para sus guías de calidad del aire. El resultado de dicha labor fueron las nuevas guías revisadas que son aplicables a todas las regiones de la OMS. La ventaja de esta última actualización (2005) es que se tiene en cuenta la heterogeneidad de los niveles de contaminación en todos los países estudiados (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Además del valor guía, se definen tres objetivos intermedios (OI) para el PM_{2.5}. Se ha demostrado que éstos se pueden alcanzar con medidas sucesivas y sostenidas de reducción. Los países pueden encontrar estos valores intermedios particularmente útiles para calcular los progresos con el paso del tiempo en el difícil proceso de reducir constantemente la exposición de la población al material particulado (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Tabla No. 1 - Guía de Calidad del Aire de Material Particulado de la Organización Mundial de la Salud. Actualización 2005

	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Objetivo intermedio-1 (OI-1)	70	35
Objetivo intermedio-2 (OI-2)	50	25
Objetivo intermedio-3 (OI-3)	30	15
Guía de calidad del aire (GCA)	20	10

En Estados Unidos existe la ley llamada “Clean Air Act”, la cual define las responsabilidades de protección y mejora de aire y la capa de ozono, de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Esta ley que fue aprobada en 1970, establece los estándares nacionales de calidad del aire para contaminantes considerados peligrosos para la salud pública y contaminantes para el medio ambiente. Divide los estándares de calidad del aire como: primarios y secundarios. Los estándares primarios establecen los límites para la protección de la salud pública incluyendo a las personas más afectadas como asmáticos, niños y mayores de edad. Los estándares secundarios se plantean para proteger el bienestar público incluyendo la protección contra la disminución de la visibilidad, daño a animales, cultivos, vegetación y edificios (U.S. Environmental Protection Agency, 2013).

Tabla No. 2 - Estándar de PM_{2.5} de la Norma de Calidad del Aire de la Agencia de Protección de Estados Unidos. Actualización 2013.

Contaminante	Estándar Primario		Estándar Secundario	
	Nivel	Tiempo promedio	Nivel	Tiempo promedio
Material Particulado (PM _{2.5})	15.0 µg/m ³	Anual ⁽¹⁾ (media aritmética)	El mismo que el primario	
	35 µg/m ³	24-horas ⁽²⁾	El mismo que el primario	

(1) Para alcanzar este estándar, el promedio de 3 años de la media del peso anual de las concentraciones de PM_{2.5}, para monitoreos simples o múltiples, orientados a comunidades, no debe exceder 15.0 µg/m³.

(2) Para alcanzar este estándar, el promedio de 3 años del percentil 98, de concentraciones de 24 horas, en cada monitoreo orientado a la población cercana al área, no debe exceder 35 µg/m³ (Efectivo en diciembre 17, 2006)

En Guatemala en el año 1986 se decretó la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Decreto 68-86), la cual en el artículo 14 establece lo siguiente:

“Para prevenir la contaminación atmosférica y mantener la calidad del aire, el Gobierno, por medio de la presente ley, emitirá los reglamentos correspondientes y dictará las disposiciones que sean necesarias para:

- a. Promover el empleo de métodos adecuados para reducir las emisiones contaminantes.
- b. Promover en el ámbito nacional e internacional las acciones necesarias para proteger la calidad de la atmósfera.
- c. Regular las sustancias contaminantes que provoquen alteraciones inconvenientes de la atmósfera.
- d. Regular la existencia de lugares que provoquen emanaciones.
- e. Regular la contaminación producida por el consumo de los diferentes energéticos.
- f. Establecer estaciones o redes de muestreo para detectar y localizar las fuentes de contaminación atmosférica.

- g. Investigar y controlar cualquier otra causa o fuente de contaminación atmosférica” (Congreso de la República de Guatemala, 1986).

En el año 1990 se estableció la Ley de Humo Negro, Acuerdo Gubernativo 1017-90, que fijaba un plazo para el ajuste de los motores de los vehículos. Luego en 1997 se emitió el Reglamento para el Control de Emisiones de los Vehículos Automotores, Acuerdo Gubernativo 14-97 para regular la calidad y cantidad de emisiones que cada vehículo podía emitir, pero en 1998 fue derogado. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales propuso un reglamento de emisiones de gases en febrero del 2002, pero no logró la aprobación del Organismo Ejecutivo y actualmente no existe ninguna regulación vigente para el control de dichas emisiones (El Periódico, 2014).

3.5 Métodos de medición de partículas

Los componentes de un sistema de monitoreo de la contaminación del aire incluyen la recolección de la muestra o muestreo de contaminantes del aire ambiental y de fuentes específicas; el análisis o medición de la concentración de los contaminantes; y la notificación y uso de la información recopilada. Los datos de las concentraciones de los contaminantes del aire se usan para determinar el cumplimiento de las normas de calidad del aire. También se usan para diagnosticar las condiciones de un área antes de construir una nueva fuente de contaminación, para desarrollar modelos de dispersión de contaminantes, para realizar estudios científicos y para evaluar la exposición humana a contaminantes y el daño al medio ambiente (Gil, 2005).

Para realizar el monitoreo y análisis de muestras generalmente se designan métodos de referencia, aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Estos métodos especifican procedimientos precisos que se deben seguir para cualquier actividad de monitoreo relacionada con el cumplimiento de la reglamentación. Estos procedimientos orientan el muestreo, análisis,

calibración de los instrumentos y cálculo de las emisiones. La elección del método específico de análisis depende de un número de factores, siendo los más importantes las características físicas del contaminante y su estado físico. Los métodos de referencia se diseñan para determinar la concentración de un contaminante en una muestra. La concentración se expresa en términos de masa por unidad de volumen, usualmente en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Gil, 2005) (Wark y Warner, 1990).

La recolección de una muestra puede realizarse mediante técnicas manuales o automáticas y el análisis o medición de los contaminantes puede hacerse por diversos medios, según las características químicas y físicas del contaminante. El método más utilizado para la medición del MP es emplear principios gravimétricos. Las partículas se atrapan en un filtro previamente secado y pesado y luego son pesadas sobre el filtro, determinando por diferencia del peso la cantidad de partículas presentes en el filtro en un determinado volumen de aire (Wark y Warner, 1990).

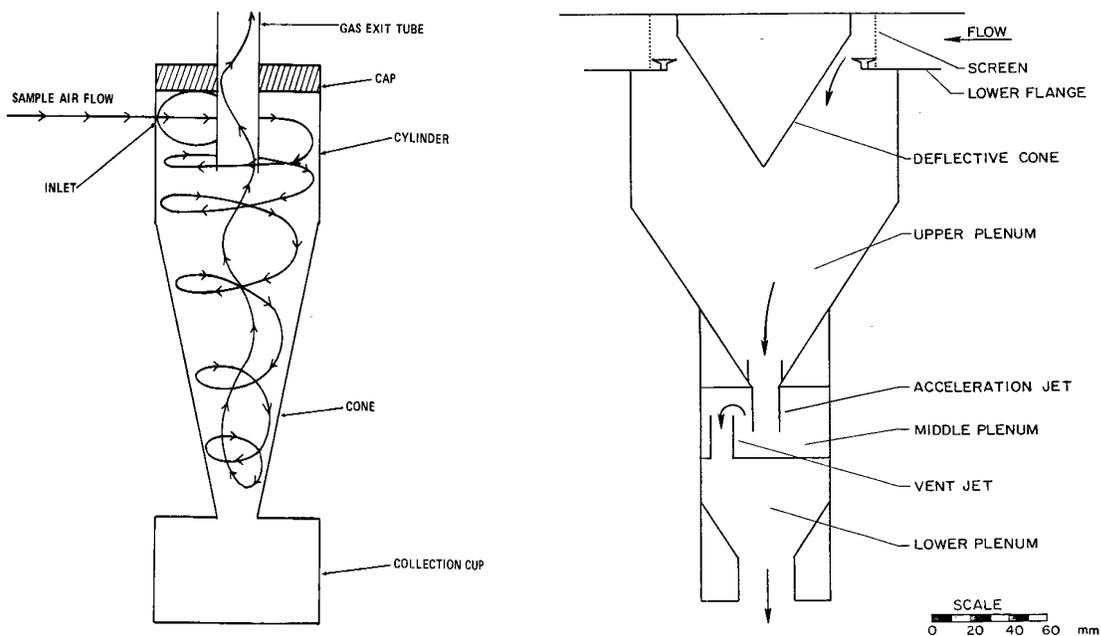
Los primeros equipos utilizados para la medición de MP fueron recipientes que se dejaban colocados en el punto de monitoreo y luego se medía la cantidad de partículas que recogían en un tiempo determinado. En la actualidad se utilizan para la medición de partículas totales sedimentables (TDF - Total dust fall), ver anexo 1 imagen No.3 (Mohammad, Mansour, Hamideh y Nemaat, 2013).

Los equipos gravimétricos empleados pueden ser de alto volumen o de bajo volumen. Los equipos de alto volumen utilizan generalmente filtros de 8" x 10", trabajan con flujos de muestreo de más de 1,000 L/min (40 CFM – pies cúbicos por minuto), se presentan para medición de MP de tamaños $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} y TSP. Su desventaja es que es un equipo grande y pesado que es difícil de transportar, por su tamaño el filtro es difícil de manipular. Su principal ventaja es que la cantidad de muestra colectada permite realizar una caracterización de las partículas

recolectadas. En la imagen No.4 en el anexo 1 se puede observar este tipo de equipos (Gil, 2005).

Los equipos de bajo volumen, trabajan a tasas de flujo de 16.7 L/min o menos, utilizan filtros de 47 mm y se encuentran para trabajar material particulado PM_{10} , $PM_{2.5}$, TSP y otros tamaños de partícula que se monitorean con menos frecuencia como PM_1 pero que la tendencia analítica es monitorear cada vez partículas de menor tamaño. A diferencia de los equipos de alto volumen, éstos son más pequeños, lo que permite su fácil manipulación y su traslado a diferentes puntos de medición. Estos equipos tienen un dispositivo de entrada del flujo del aire que permite la separación de las partículas, lo más común es usar separadores de partículas tipo ciclón o tipo cascada (Gil, 2005).

Imagen No. 1 – Tipos de separadores de partículas (Fuente: BGI Incorporated. www.bgiusa.com).



Separador tipo Ciclón

Separador tipo Cascada

Imagen No. 2 – Muestreadores de bajo volumen (Fuente: BGI Incorporated. www.bgiusa.com).



PQ200 de BGI Incorporated



OMNI ft de BGI Incorporated

También existen equipos automáticos de medición de partículas que miden y toman una muestra cada hora por 24 o más horas en una cinta de filtro desmontable que permite evaluar las partículas colectadas cada hora, además estos equipos por una tecnología de medición de la atenuación de una fuente de radiación beta, calculan la concentración de partículas en cada toma de muestra. Estos equipos permiten la medición de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 .

Otros equipos de atenuación beta miden las partículas del ambiente en tiempo real, lo que permite hacer un perfil de medición de partículas de un día entero de medición. Estos equipos se pueden programar para que realicen mediciones hasta cada segundo.

Otra tecnología que se utiliza para la medición de partículas en tiempo real es la tecnología TEOM, que consiste en un sistema que detecta la oscilación que las

partículas producen al chocar con el sensor. En las imágenes No. 5 y No. 6 en el anexo 1 se pueden observar este tipo de equipos.

En el anexo 2 se muestra el listado de métodos de referencia para la determinación de $PM_{2.5}$, en el cual están incluidos los equipos mencionados.

3.6 Estudios desarrollados en Guatemala

Muchas empresas privadas realizan monitoreos de calidad del aire en sus instalaciones o en lugares aledaños para determinar el impacto que sus emanaciones tienen al aire y determinar si deben establecer alguna acción para mejorar su tecnología y así evitar la contaminación que pudieran estar generando; esto es algo muy bueno, sin embargo muchas son las empresas que no prestan atención al tema ambiental.

Por esta razón es muy importante el trabajo desarrollado por el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, pues desde el año 1995 se vienen desarrollando monitoreos en varios puntos de la ciudad capital. Los parámetros que se miden actualmente en los puntos de monitoreo en la ciudad son: partículas totales en suspensión (PTS), partículas totales en suspensión en una fracción menor a 10 micrómetros (PM_{10}), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), ozono (O_3) (eventual), monóxido de carbono (CO) y lluvia ácida; estos parámetros se utilizan como criterio para determinar la calidad del aire de la capital de Guatemala. En los resultados obtenidos de las mediciones de material particulado en su fracción de PM_{10} , se puede observar que el promedio anual desde el año 1995 en muchos de los casos está por encima del valor guía de calidad establecido para éste parámetro, especialmente en el punto de medición del INCAP, que es el punto de referencia de la calzada Roosevelt (Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Laboratorio de Monitoreo del Aire, 2011).

Tabla No. 3 - Resultados de promedio anual para PM₁₀ (1996-2011) (Fuente: Informe Anual 2011. Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. USAC, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Laboratorio de Monitoreo del Aire)

ESTACION	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
MUSAC	57	40	68	55	47	33	30	61	54	30	55	53	38	29	56	69
INCAP	143	143	0	0	71	59	67	71	82	83	90	80	77	59	75	87
USAC	50	50	52	49	33	42	34	54	38	48	62	42	19	50	44	40
INSIUMEH	0	50	0	0	39	37	35	49	31	33	45	49	32	30	53	49

Nota: Para la USAC se midió a micro escala de 1996 a 1999, y a macro escala a partir del año 2000.

nm: no muestreado.

■ Valor que sobrepasa el límite sugerido

En el año 2011 los valores de las mediciones mensuales de PM₁₀ de 24 horas son muy variables, pero muchos de ellos exceden el valor guía recomendado.

Tabla No. 4 - Resultados de la medición de PM₁₀ del año 2011 (Fuente: Informe Anual 2011. Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. USAC, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Laboratorio de Monitoreo del Aire)

ESTACION	ENE	ENE	FEB	FEB	MAR	MAR	ABR	ABR	MAY	MAY	JUN	JUN	JUL	JUL	AGO	AGO	SEP	SEP	OCT	OCT	NOV	NOV	DIC	DIC	PA
USAC	26	61	34	40	14	82	20	31	50	45	20	92	12	62	95	45	25	79	2	42	19	17	16	33	40
MUSAC	nm	89	57	69	181	91	82	106	74	64	84	36	19	26	76	36	nm	17	nm	54	105	39	nm	nm	69
INCAP	nm	86	112	93	219	104	159	174	106	123	58	23	52	72	45	nm	69	77	36	36	96	79	50	45	87
INSIUMEH	nm	60	41	nm	128	124	82	101	69	68	45	nm	22	23	45	16	2	9	43	4	36	23	26	58	49

nm: No muestreado.

PA: Promedio Anual.

■ Valor que sobrepasa el límite sugerido

4. JUSTIFICACIÓN

El Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, realiza la actividad de monitoreo de calidad del aire desde el año 1995, por lo que se cuenta ya con una buena cantidad de información referente a la contaminación del aire en varios puntos la Capital. Sin embargo dentro de los parámetros que se monitorean actualmente, no está incluido el material particulado en fracción menor o igual a 2.5 micrómetros, aunque la Organización Mundial de la Salud lo ha establecido como un contaminante criterio y existe la tendencia a monitorear partículas cada vez más pequeñas.

Por lo tanto es importante implementar el método de $PM_{2.5}$ en el sistema operativo del Laboratorio de Monitoreo del Aire, para así ampliar el estudio de la calidad del aire de Guatemala, con la medición de este tamaño de partícula que es más fina y por lo tanto más peligrosa para la salud; además este criterio permitirá establecer de mejor manera, las principales fuentes de contaminación del aire en la Ciudad de Guatemala.

En Guatemala es necesario seguir haciendo conciencia de la contaminación del aire, ya que es uno de los recursos naturales principales para la vida y el desarrollo del ser humano, de los animales y la plantas. De acuerdo a los resultados obtenidos hasta el momento por el Laboratorio de Calidad del Aire, se sabe que nos encontramos con niveles de los contaminantes medidos por arriba de los valores guía establecidos en las normas internacionales como los de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Por ello es necesario que la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia continúe con este monitoreo y que sigan presentando sus resultados al sector público, de

forma que las autoridades competentes desarrollen programas de protección de la calidad del aire.

El trabajo de tesis que se propuso, integró a los parámetros de medición que actualmente se están monitoreando, la medición de partículas totales en suspensión en una fracción menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$). La medición de estas partículas que son más finas que las PM_{10} es importante debido a que por su tamaño, pueden penetrar más profundamente en el tracto respiratorio, llegando a los alveolos pulmonares, provocando daños severos en los pulmones. Además es importante el hecho de que estas partículas, por ser más finas, pueden permanecer en el aire más tiempo y de esta forma ser transportadas a mayores distancias, y por lo tanto llegar a estar en contacto con más personas. Los estudios muestran que estas partículas no solo afectan al sistema respiratorio sino también al cardiovascular, de allí que las organizaciones internacionales estén dándole mucha importancia al monitoreo de las partículas finas y estén evaluando su impacto en la salud.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Determinar la concentración de partículas totales en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), en la ciudad capital de Guatemala, en las estaciones de monitoreo del Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química.

5.2 Objetivos específicos

5.2.1 Implementar una técnica de medición para la determinación de partículas totales en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), en el Laboratorio de Monitoreo del Aire.

5.2.2 Determinar si la concentración de partículas totales en suspensión, en su fracción menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), de los puntos de muestreo en la ciudad capital de Guatemala, se encuentra por arriba del valor guía de la OMS.

5.2.3 Determinar la diferencia que causa la época de lluvia en la determinación del contenido de las partículas totales en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), en los puntos de muestreo en la ciudad capital de Guatemala.

6. HIPÓTESIS

La concentración de las partículas totales en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), en el aire de 4 puntos de muestreo, en la ciudad capital de Guatemala, sobrepasa el valor de las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS), $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Universo

El universo de trabajo es el aire del día y hora del monitoreo en los puntos establecidos de la ciudad capital de Guatemala.

7.1.1 Muestra

La muestra la conforman las partículas de $PM_{2.5}$ recolectadas durante 24 horas, una vez al mes y durante un año, en los siguientes puntos de monitoreo:

- Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), calzada Roosevelt 11-65 zona 11. Terraza de oficina que da hacia la calzada Roosevelt.
- Universidad San Carlos de Guatemala (USAC), Ciudad Universitaria zona 12. Terraza del Edificio T-10, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia
- Museo de la Universidad San Carlos de Guatemala (MUSAC), 9a Av. 9-79 zona 1. Terraza del edificio que da hacia la 9a. Av.
- Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH), 7a. Av. 14-57 zona 13. Terraza del edificio principal.

Los puntos de monitoreo fueron establecidos por el Laboratorio de Monitoreo del Aire tomando en cuenta la seguridad del equipo de monitoreo y que en las instalaciones existen las condiciones técnicas para la colocación y funcionamiento del equipo, así como su ubicación en el área centro-sur de la ciudad de Guatemala.

7.2 Materiales

- 1 Equipo de monitoreo de partículas OMNI ftr,
- 1 Equipo de calibración de flujo Tetracal,
- 1 Trípode para colocar el equipo de monitoreo
- 12 Filtros de PTFE de 2 micrómetros de tamaño de poro y 46.2 mm de diámetro
- 1 Soporte de filtro
- 1 Pinza
- 1 Caja transportadora de soportes de filtro
- 1 Balanza analítica con una precisión de +/- 0.00001 g
- 1 Desecadora con sílica gel indicadora de humedad
- Patrones de pesado (masas de calibración)
- 12 pares de guantes de poliestireno
- 1 Bata
- 1 GPS
- 1 Extensión eléctrica
- 1 Regleta eléctrica
- 12 Boletas de campo
- 1 Computadora portátil
- 1 Impresora
- Hojas de papel bond
- Lapiceros

Todos los materiales son propiedad de un laboratorio ambiental privado de Guatemala.

7.3 Método

Para el monitoreo de partículas en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros, se utilizará un método gravimétrico, el cual se describe a continuación:

7.3.1 Preparación de los filtros.

Debe determinarse el peso de los filtros secos. Para esto se procede a colocar los filtros en una desecadora con sílica gel con indicador de humedad. Se dejan los filtros por lo menos por 48 horas en la desecadora. Posteriormente se pesan los filtros en una balanza de 5 decimales para determinar su peso inicial (tara). Los filtros se colocan en los soportes de filtros, debidamente identificados, y se colocan en las cajas transportadoras. El peso inicial del filtro se anota en la boleta de registro del monitoreo.

7.3.2 Transporte de los filtros.

Es importante transportar los filtros en sus cajas, pues de esta manera se evita que se contaminen o sufran algún deterioro en el trayecto del laboratorio al punto de monitoreo. La caja transportadora se coloca junto con el equipo de monitoreo y se transporta al lugar donde se realizará la medición.

7.3.3 Antes de la Instalación del equipo de monitoreo

El equipo funciona con una batería recargable de 12 V y 5 A, o con corriente eléctrica. Si en el punto de monitoreo no hay corriente eléctrica debe estarse seguro de que la batería está 100% cargada (la batería al 100% provee carga para 30 horas de trabajo). Es importante asegurarse de la limpieza del "inlet" (brazo de entrada del sistema de succión de la muestra), antes de su instalación. Hay que verificar que se está utilizando el selector de tamaño de partícula correcto, en este caso el de PM_{2.5}.

El equipo OMNI ftr funciona a una tasa de flujo de succión de aire de 5 Lpm, es importante verificar que el flujo que el equipo está indicando sea el correcto. Esto

se hace utilizando un calibrador de flujo de aire certificado, como el Tetracal (El procedimiento de calibración del equipo se muestra en el anexo 3).

7.3.4 Instalación del equipo de monitoreo

Se procede a colocar el equipo OMNI ftr, este equipo es portátil y se coloca sobre su trípode a una altura entre 1.5 y 2.0 m. El equipo puede funcionar a una temperatura entre -30 y 50 °C. El filtro se coloca en el compartimiento del filtro del equipo de monitoreo OMNI ftr, para esto se desenrosca el compartimiento del filtro y se coloca el soporte del filtro (ya con el filtro colocado), luego se vuelve a enroscar. Sobre el compartimiento del filtro se coloca el “inlet”.

7.3.5 Procedimiento de inicio del monitoreo

Se abre la puerta que da acceso al panel de control y pantalla del equipo. Se presiona la tecla de encendido y se muestra la pantalla de inicio donde indica el número de serie del equipo, seguido se despliega el menú principal. Es importante anotar en la boleta de registro del monitoreo el número de serie del equipo utilizado para poder dar trazabilidad a la medición. Utilizando las flechas del panel de control, se coloca la flecha (cursor) en el comando “iniciar medición” y se presiona la tecla *Enter*. La bomba de succión del equipo empezará a funcionar, en la pantalla se observa el flujo, la temperatura, la presión barométrica, el tiempo de monitoreo y una indicación del porcentaje de carga de la batería. Estos datos se anotan en la boleta de registro del monitoreo. Luego de observar por unos 5 minutos que el flujo se mantiene constante a 5 Lpm, se cierra la puerta de acceso al panel y se asegura con dos candados. Se deja trabajando por 24 horas.

7.3.6 Procedimiento de final del monitoreo

Al día siguiente, se abre la puerta del panel de control y se observa el tiempo de monitoreo, este debe ser 24 horas \pm 1 hora. Se presiona la tecla *Enter* y la bomba de succión deja de funcionar, en la pantalla se observa la fecha y hora de inicio del monitoreo, la fecha y hora de la finalización del monitoreo, el flujo promedio del

monitoreo, el volumen total de aire que pasó a través del filtro y el volumen estándar calculado. Estos datos se anotan en la boleta de registro del monitoreo. Luego se retira el “inlet” y se guarda en su caja, se abre el compartimiento del filtro y se retira el soporte del filtro con el filtro que ha recogido la muestra, este se coloca en la caja transportadora y con cuidado de no voltearlo se lleva hasta el laboratorio.

7.3.7 Tratamiento final del filtro

Sobre una mesa de laboratorio se abre el soporte del filtro y con la ayuda de una pinza se retira el filtro, se coloca sobre un vidrio de reloj ó cualquier otro soporte y se coloca en la desecadora por 48 horas. El filtro seco se retira de la desecadora y se pesa en la balanza de 5 decimales. Se anota en la boleta de registro del monitoreo el peso del filtro + la muestra. Por diferencia se determina el peso de las partículas PM_{2.5}.

7.3.8 Cálculo final

Se calcula el volumen de aire que pasó a través del filtro, en metros cúbicos, en el total del tiempo de monitoreo. Se divide el contenido de partículas entre el volumen de aire y se reporta el resultado en microgramos de partículas por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

7.3.9 Puntos críticos del monitoreo

Los puntos críticos de la metodología del monitoreo son:

a) El pesado de los filtros hasta peso constante en la balanza de 5 decimales. Es importante utilizar una balanza certificada para determinar los pesos de los filtros, pues los pesos a determinar se encuentran en el orden de los microgramos. La balanza que se utilizará es calibrada 2 veces al año por un organismo de calibración acreditado y diariamente se realiza un proceso de verificación con masas certificadas por el Laboratorio Nacional de Metrología.

b) La calibración del flujo de aire (Lpm) del equipo. Es importante utilizar un equipo certificado de calibración de flujo para verificar que el flujo reportado por el equipo es exacto. El equipo que se utilizará es calibrado en fábrica una vez al año y cuenta con su certificado de calibración.

c) El transporte del filtro y su manejo en el laboratorio. Es muy fácil que las partículas que quedaron depositadas en el filtro se pierdan por mala manipulación. Durante el transporte es importante mantener el filtro en el soporte y en su caja y todo el tiempo boca arriba. En el laboratorio debemos tener el cuidado de incluir cualquier partícula “suelta” en el peso. También es importante la manipulación del filtro con las pinzas y teniendo cuidado de no dañarlo pues cualquier daño puede causar error en la pesada del mismo.

El detalle del uso del equipo se muestra en el anexo 3.

7.3.10 Análisis de los resultados y puntos de monitoreo

Luego de obtener los resultados de cada medición, se comparará estos con las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud para determinar si sobrepasan el valor guía o no.

Se comparará el resultado promedio de los resultados obtenidos en época lluviosa como en época seca para determinar la diferencia que marca la lluvia en las partículas en suspensión.

Cada uno de los resultados obtenidos se comparará con el resultado de la medición de las partículas totales en suspensión en su fracción menor a 10 micrómetros, para determinar si existe una la relación constante $PM_{10}/PM_{2.5}$ en cada uno de los puntos de monitoreo.

8. RESULTADOS

A continuación se presentan las tablas con los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en los lugares de monitoreo establecidos en el año 2012:

Tabla No. 5 – Resultados de las mediciones de PM_{2.5} durante el año 2012

Enero					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro (g)	Peso final filtro (g)	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14426	0.14477	0.00051	7.17	71.4
INSIVUMEH	0.14392	0.14408	0.00016	6.69	24.1
MUSAC	0.14472	0.14501	0.00029	6.78	43.2
USAC	0.14490	0.14508	0.00018	6.78	27.2

Febrero					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14431	0.14470	0.00039	6.76	58.4
INSIVUMEH	0.14399	0.14415	0.00016	6.74	23.4
MUSAC	0.14428	0.14459	0.00031	6.78	45.3
USAC	0.14445	0.14467	0.00022	6.75	32.9

Marzo					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14503	0.14540	0.00037	6.72	55.6
INSIVUMEH	0.14462	0.14474	0.00012	7.14	17.4
MUSAC	0.14501	0.14531	0.00030	6.79	44.5
USAC	0.14486	0.14514	0.00028	6.73	41.8

Abril					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14465	0.14503	0.00038	6.77	56.8
INSIVUMEH	0.14432	0.14445	0.00013	6.76	19.6
MUSAC	0.14492	0.14520	0.00028	6.68	41.4
USAC	0.14426	0.14455	0.00029	6.75	42.6

Mayo					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14389	0.14431	0.00042	6.69	63.1
INSIVUMEH	0.14473	0.14489	0.00016	6.72	24.4
MUSAC	0.14428	0.14459	0.00031	7.14	43.7
USAC	0.14476	0.14501	0.00025	6.76	37.3

Junio					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14491	0.14530	0.00039	6.76	57.4
INSIVUMEH	0.14511	0.14528	0.00017	6.69	24.8
MUSAC	0.14432	0.14460	0.00028	6.76	40.7
USAC	0.14462	0.14488	0.00026	6.78	38.8

Julio					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14456	0.14493	0.00037	6.79	55.2
INSIVUMEH	0.14508	0.14521	0.00013	6.68	19.3
MUSAC	0.14482	0.14510	0.00028	6.75	41.4
USAC	0.14396	0.14418	0.00022	6.77	32.7

Agosto					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14442	0.14483	0.00041	6.76	61.3
INSIVUMEH	0.14487	0.14501	0.00014	6.78	20.0
MUSAC	0.14435	0.14460	0.00025	6.77	36.8
USAC	0.14461	0.14477	0.00016	6.69	24.4

Septiembre					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14429	0.14474	0.00045	6.69	67.1
INSIVUMEH	0.14510	0.14524	0.00014	7.17	19.2
MUSAC	0.14498	0.14525	0.00027	6.78	40.1
USAC	0.14487	0.14502	0.00015	6.77	22.4

Octubre					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14426	0.14466	0.00040	6.76	59.7
INSIVUMEH	0.14471	0.14483	0.00012	6.78	17.4
MUSAC	0.14426	0.14453	0.00027	6.77	39.4
USAC	0.14452	0.14468	0.00016	6.78	22.9

Noviembre					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14507	0.14549	0.00042	6.76	62.4
INSIVUMEH	0.14467	0.14478	0.00011	6.77	16.3
MUSAC	0.14431	0.14458	0.00027	6.79	39.1
USAC	0.14474	0.14493	0.00019	6.71	27.8

Diciembre					
Punto de muestreo	Peso inicial filtro	Peso final filtro	Diferencia de peso (g)	Volumen total (m ³)	[µg/m ³]
INCAP	0.14428	0.14475	0.00047	7.16	66.3
INSIVUMEH	0.14393	0.14406	0.00013	6.78	19.7
MUSAC	0.14426	0.14455	0.00029	6.78	42.3
USAC	0.14453	0.14476	0.00023	6.76	33.6

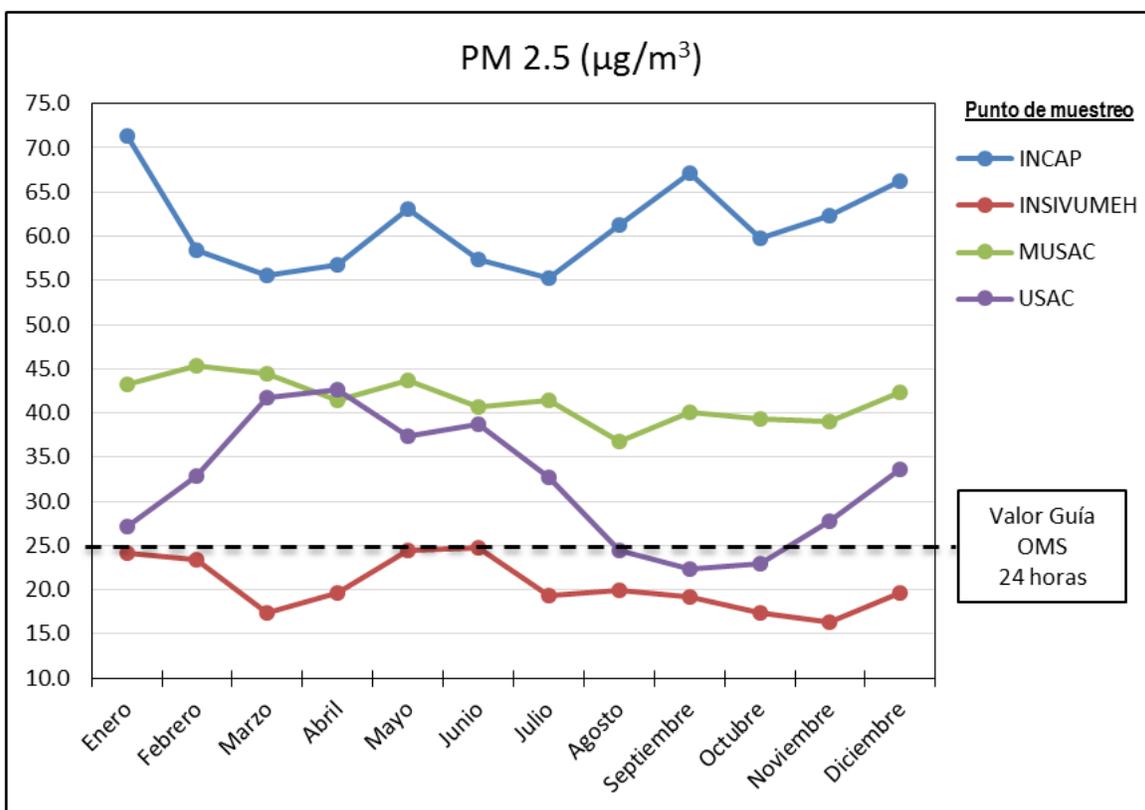
Fuente: Datos generados en esta investigación.

Tabla No. 6 – Resumen mensual de las mediciones de PM_{2.5} durante el año 2012

PM _{2.5} (µg/m ³) Punto de muestreo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
INCAP	71.4	58.4	55.6	56.8	63.1	57.4	55.2	61.3	67.1	59.7	62.4	66.3
INSIVUMEH	24.1	23.4	17.4	19.6	24.4	24.8	19.3	20.0	19.2	17.4	16.3	19.7
MUSAC	43.2	45.3	44.5	41.4	43.7	40.7	41.4	36.8	40.1	39.4	39.1	42.3
USAC	27.2	32.9	41.8	42.6	37.3	38.8	32.7	24.4	22.4	22.9	27.8	33.6

Fuente: Datos generados en esta investigación.

Imagen No. 3 – Gráfica de resultados mensuales de PM_{2.5} durante el año 2012



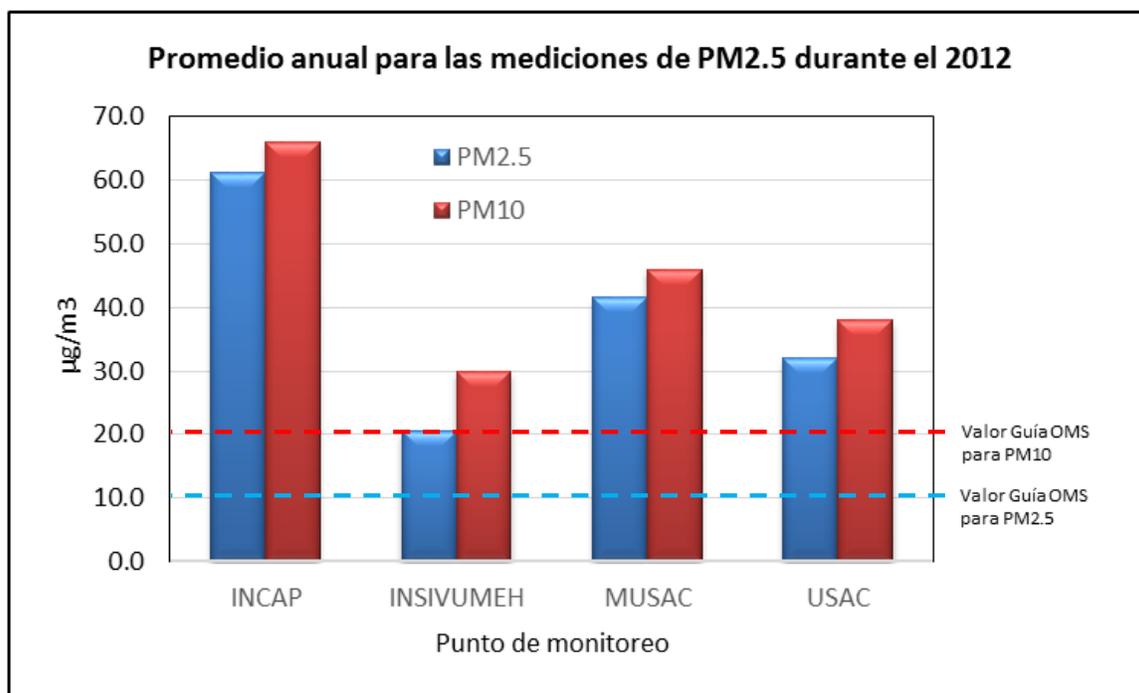
Fuente: Datos generados en esta investigación.

Tabla No. 7 – Resumen del promedio aritmético anual de las mediciones de PM_{2.5} durante el año 2012

Punto de muestreo	Promedio Anual 2012		% PM2.5
	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
INCAP	61.2	66.0	93
INSIVUMEH	20.5	30.0	68
MUSAC	41.5	46.0	90
USAC	32.0	38.0	84
<i>Valor guía OMS</i>	<i>10.0</i>	<i>20.0</i>	

Fuente: Datos generados en esta investigación.

Imagen No. 4 – Gráfica del promedio anual de PM_{2.5} durante el año 2012



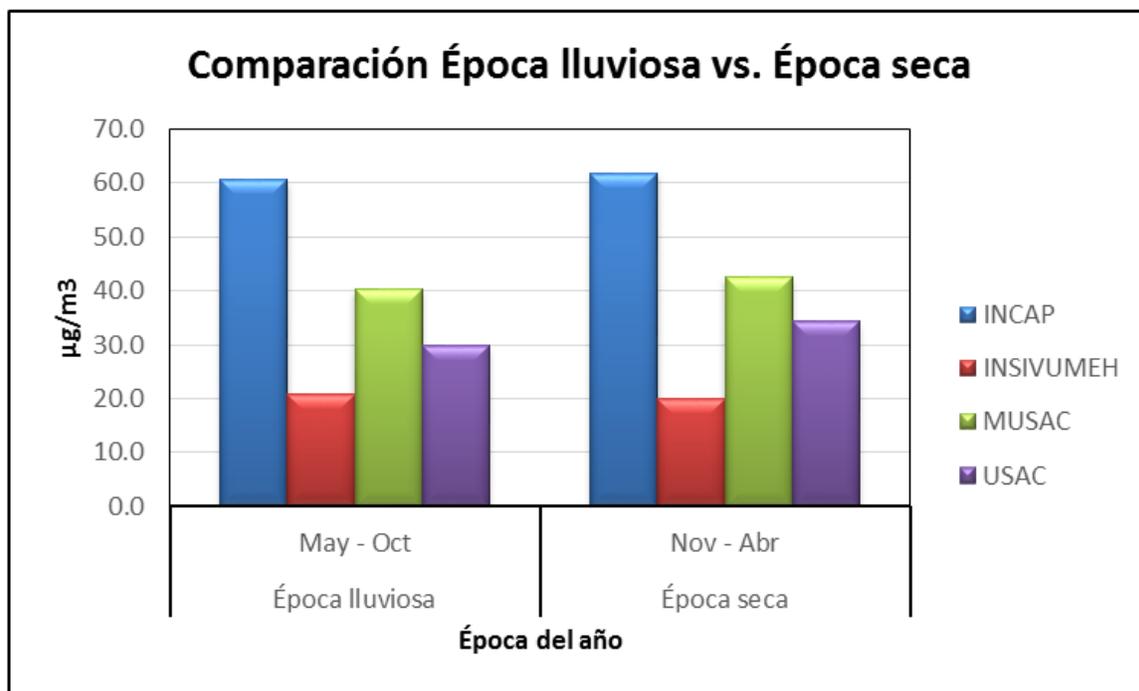
Fuente: Datos generados en esta investigación.

Tabla No. 8 – Resumen del promedio aritmético de las mediciones de PM_{2.5} por estación climática del año 2012

Punto de muestreo	Promedio PM _{2.5} (µg/m ³)	
	Época lluviosa May - Oct	Época seca Nov - Abr
INCAP	60.6	61.8
INSIVUMEH	20.9	20.1
MUSAC	40.4	42.6
USAC	29.8	34.3

Fuente: Datos generados en esta investigación.

Imagen No. 5 – Gráfica de comparación de las dos épocas del año



Fuente: Datos generados en esta investigación.

9. DISCUSIÓN

Se observa en la tabla No. 5 y la imagen No. 3 que en las mediciones de 24 horas los resultados obtenidos en los puntos MUSAC e INCAP en todos los meses, se encuentran por arriba de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, límite establecido como valor guía por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En el caso del punto de monitoreo en la USAC, en los meses agosto, septiembre y octubre, los resultados obtenidos estuvieron por debajo del valor guía de la OMS y los demás meses por arriba del mismo. En el punto de monitoreo en el INSIVUMEH, todos los resultado del año se mantuvieron por debajo del valor guía de la OMS.

Por su ubicación en la 9a. avenida de la zona 1, en pleno centro de la ciudad y en calzada Roosevelt y 6a. calle de la zona 11, muy cerca del Trébol, los puntos MUSAC e INCAP se encuentran ubicados en lugares de alto tráfico vehicular y sobre todo son lugares donde circulan tanto vehículos livianos como buses del transporte público y en el caso de la calzada Roosevelt, extraurbanos y transporte pesado. Por esta razón se puede inferir que la mayor carga contaminante de material particulado en estas dos áreas es producto de la combustión incompleta de los vehículos automotores. Los resultado en el punto INCAP, son superiores a los del punto MUSAC precisamente porque la carga vehicular en ese punto en la calzada Roosevelt es mayor que en la zona 1.

El punto en la USAC, que se ubica en la azotea del edificio T-10, es un área muy abierta y con mucha vegetación, esto hace que aunque exista circulación de vehículos livianos, la concentración del material particulado es menor. También el hecho que se encuentre en la terraza del tercer nivel de un edificio favorece que el viento llegue directamente al equipo de monitoreo, lo cual puede tener dos consecuencias: que el material particulado que se genera en el área se disperse a otros lugares y no se recoja en el filtro, o que algún material particulado de áreas lejanas al equipo de monitoreo pueda llegar a éste y recogerse en el filtro en el

monitoreo. El campus central de la USAC está cerca de la avenida Petapa, arteria de gran circulación vehicular, también un poco más retirado se encuentra la avenida Aguilar Batres y el inicio del Periférico Sur, por lo que mucho material particulado proveniente del proceso de combustión vehicular puede llegar al equipo de monitoreo. Además hay muchas planicies aledañas en las que el viento puede levantar polvo que puede también llegar al equipo de monitoreo.

El área aledaña al punto de monitoreo en el INSIVUMEH, zona 13, es de bajo movimiento vehicular y aunque se encuentra cerca el aeropuerto internacional, el área es más que todo residencial, por lo que es normal que los resultados del monitoreo en este lugar se encuentren por debajo del valor guía indicado por la OMS.

De acuerdo a los datos tabulados en la tabla No. 7 y la gráfica de la imagen No. 4, al comparar los resultados promedio anual de $PM_{2.5}$ con el valor guía indicado por la OMS para una media aritmética anual, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se puede observar que todos los puntos de monitoreo se encuentran con un resultado promedio por arriba de este valor. Esto significa que en todas las áreas monitoreadas la exposición prolongada al ambiente puede a largo plazo producir problemas de salud a la población. Estos resultados confirman la hipótesis planteada que indicaba que la concentración de las partículas totales en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), en el aire de 4 puntos de muestreo, en la ciudad capital de Guatemala, sobrepasa el valor de las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS 2005), $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La OMS ha establecido valores guía intermedios para que las autoridades puedan utilizarlos como metas para ir logrando la disminución gradualmente de las emisiones de material particulado contaminante. El valor del primer objetivo intermedio para una exposición prolongada lo plantea la OMS en $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo

que los puntos en INCAP y MUSAC, estarían por arriba de este valor, representando una mala calidad del aire en el sector.

Para la exposición diaria al ambiente, la OMS plantea un objetivo intermedio primario de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De acuerdo a los resultados obtenidos, en todos los puntos de monitoreo los valores de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ se encuentran por debajo de este valor.

Tal como puede verse en la tabla No. 7, al comparar los resultados promedio anuales obtenidos de las mediciones de $\text{PM}_{2.5}$ con los de las mediciones de PM_{10} , se observa que en los puntos INCAP y MUSAC, más del 90% de las partículas recolectadas corresponden a la fracción de $\text{PM}_{2.5}$, esto confirma que la contaminación en esos lugares se debe principalmente a las partículas provenientes de la combustión de los vehículos circundantes. De la misma forma sucede en el punto USAC en el que las partículas de $\text{PM}_{2.5}$ corresponden al 84% de las PM_{10} . En el punto INSIVUMEH se presenta un 68%. De acuerdo a los estudios realizados por la OMS en países desarrollados la relación de $\text{PM}_{2.5} / \text{PM}_{10}$ se mantiene entre 50% - 80%, por lo que los resultados en INCAP, USAC y MUSAC demuestran que el ambiente en estas áreas es de riesgo para la salud, pues la mayoría de las partículas son $\text{PM}_{2.5}$. El resultado en INSIVUMEH presenta un comportamiento similar al indicado por la OMS.

En la tabla No. 8 y la imagen No. 5 se observa el promedio de las mediciones de $\text{PM}_{2.5}$ que se realizaron durante todo el año 2012 y las diferencias de los resultados en época de lluvia y en época seca. En época lluviosa los resultados deberían ser más bajos que en época seca, pues la lluvia recoge muchas partículas que ya no llegan al equipo de monitoreo. En Guatemala tenemos la particularidad que en época de lluvia no llueve todos los días y no llueve todo el día, además el monitoreo que se realizó fue durante un solo día del mes, por lo que los resultados representan el nivel de contaminación específico del día de monitoreo. En los puntos INCAP,

MUSAC y USAC, se observa una disminución de los resultados en la época lluviosa, no fue así en el punto INSIVUMEH, el resultado en época de lluvia fue $20.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en época seca fue $20.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Como los resultados en éste punto son bajos, se observa poca influencia del clima en ellos. El punto en el que se observó mayor diferencia fue en USAC, en donde en época de lluvia se obtuvo un promedio de $29.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en época seca un promedio de $34.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

10. CONCLUSIONES

10.1 En las áreas aledañas a los puntos de monitoreo INCAP, MUSAC y USAC, la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ se encuentra en niveles peligrosos para la salud de los guatemaltecos, pues los resultados obtenidos son superiores al valor guía de la Organización Mundial de la Salud para una medición de 24 horas.

10.2 La concentración de material particulado $PM_{2.5}$ en el punto INSIVUMEH y áreas aledañas, no presenta un riesgo para las personas del área, pues los resultados obtenidos se encuentra en niveles inferiores a lo indicado en el valor guía de la Organización Mundial de la Salud para una medición de 24 horas.

10.3 En los cuatro puntos monitoreados el valor promedio anual de la concentración de material particulado $PM_{2.5}$, muestra que para una exposición a largo plazo existe un riesgo para la salud de las personas expuestas al ambiente monitoreado, pues los resultados se encuentra en niveles superiores a lo indicado en el valor guía de la Organización Mundial de la Salud.

10.4 En los puntos INCAP, MUSAC y USAC, es factible que la fuente de emisión de mayor consideración de material particulado $PM_{2.5}$ sea la combustión de los motores de los vehículos circundantes, pues el contenido de partículas $PM_{2.5}$ es mayor al 80% de las PM_{10} .

10.5 De acuerdo a los resultados obtenidos, en época de lluvia el contenido de material particulado $PM_{2.5}$ se presenta en menor concentración que en época seca; sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos, esto no significa que el riesgo a la salud esté presente en ambas épocas del año.

11. RECOMENDACIONES

11.1 Por la importancia que tiene para la salud de los guatemaltecos, el monitoreo de material particulado $PM_{2.5}$ debe continuar realizándose, por lo que es necesario la compra del equipo de monitoreo de dicho contaminante criterio, para el uso del Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química.

11.2 La Universidad San Carlos de Guatemala, como ente rector en la educación superior y desarrollo tecnológico, debe solicitar seriamente a las autoridades de gobierno que se establezca una normativa nacional para la disminución de las emisiones de partículas al ambiente.

11.3 La Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia debe fortalecer el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química, para que se pueda ampliar la red de monitoreo ambiental en la capital de Guatemala y así poder establecer el perfil de la calidad del aire en toda el área metropolitana del país.

11.4 En cada punto de monitoreo ambiental se debería colocar una estación meteorológica, de forma que se pueda determinar los datos de velocidad y dirección de viento, así como temperatura y humedad relativa; para así poder en el futuro establecer un modelo de dispersión de partículas para la capital de Guatemala.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

12.1 Ballester, F., Iñiguez, C., Pérez, S., Tenías, J. (2002). Contaminación atmosférica por partículas y salud en Valencia, 1994-1996. doi: 10.1016/S0213-9111(02)71967-5

12.2 Congreso de la República de Guatemala. (1986). *Decreto No. 68-86: Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente*. Guatemala: Diario Oficial de Centroamérica

12.3 El Periódico. (2014). *Sección Opine usted: ¿Quién hace algo para evitar la contaminación del aire en la ciudad?* Recuperado de: <http://www.elperiodico.com.gt/es/20100826/opineusted/172094/>

12.4 Gil, O. (2005). *Apuntes Sobre Ingeniería Ambiental*. Guatemala: Editorial Oscar Gil Girón.

12.5 Gobierno de España. Ministerio de Medio Ambiente. (2011). *Evaluación Integral del Impacto de las Emisiones de Partículas de los Automóviles en la calidad del aire urbano 2007 – 2010*. España: EPAU.

12.6 Manual Merck de Información Médica para el Hogar. (2013). *Trastornos del aparato respiratorio*. Recuperado de: https://www.msdsalud.es/tu-salud-al-dia/biblioteca-recursos/manual-merck/manual-merck-hogar.html?p=mm_aparato_respiratorio

12.7 Mohammad, M., Mansour, G., Hamideh, A., Nemaat, A. (2013). *Urban Dust Fall Concentration and Its Properties in Kerman City, Iran*. Recuperado de: www.jhealthscope.com.

12.8 Muñoz, R., Carmona, M., Pedroza, J., Granados, M. (1999). *Análisis de datos de PM_{2.5} registrados con equipo TEOM en las estaciones Azcapotzalco (ACZ) y Santa Ursula (SUR) de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)*.

México: OPS

12.9 Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guías de la calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre*. Suiza: OMS

12.10 Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2002). *Orientación para el control de la contaminación del aire*. Lima: CEPIS.

12.11 State and Territorial Air Pollution Program Administrators. (2006). *Controlling Fine Particulate Matter*. Washington: STAPPA

12.12 SWISS-CONTACT. Programa: Aire Puro. (2001) *Monitoreo del Aire. Manual de Laboratorio*. Guatemala: USAC

12.13 Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Laboratorio de Monitoreo del Aire. (2011). *Informe Anual 2011, Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala*. Guatemala: USAC

12.14 U.S. Environmental Protection Agency. (2013). *Fine Particle (PM_{2.5}) Designations*. Recuperado de: www.epa.gov/pmdesignations/faq.htm

12.15 Wark, K., Warner, C. (1990). *Contaminación del Aire, Origen y Control*. México: Editorial Limusa.

13. ANEXOS

13.1 Imágenes

Imagen No. 6 – Muestreador de sólidos totales sedimentables. Estándar BS 1774 (Fuente: Mohammad, M., et.al. (2013). Urban Dust Fall Concentration and Its Properties in Kerman City, Iran. Recuperado de: www.jhealthscope.com)

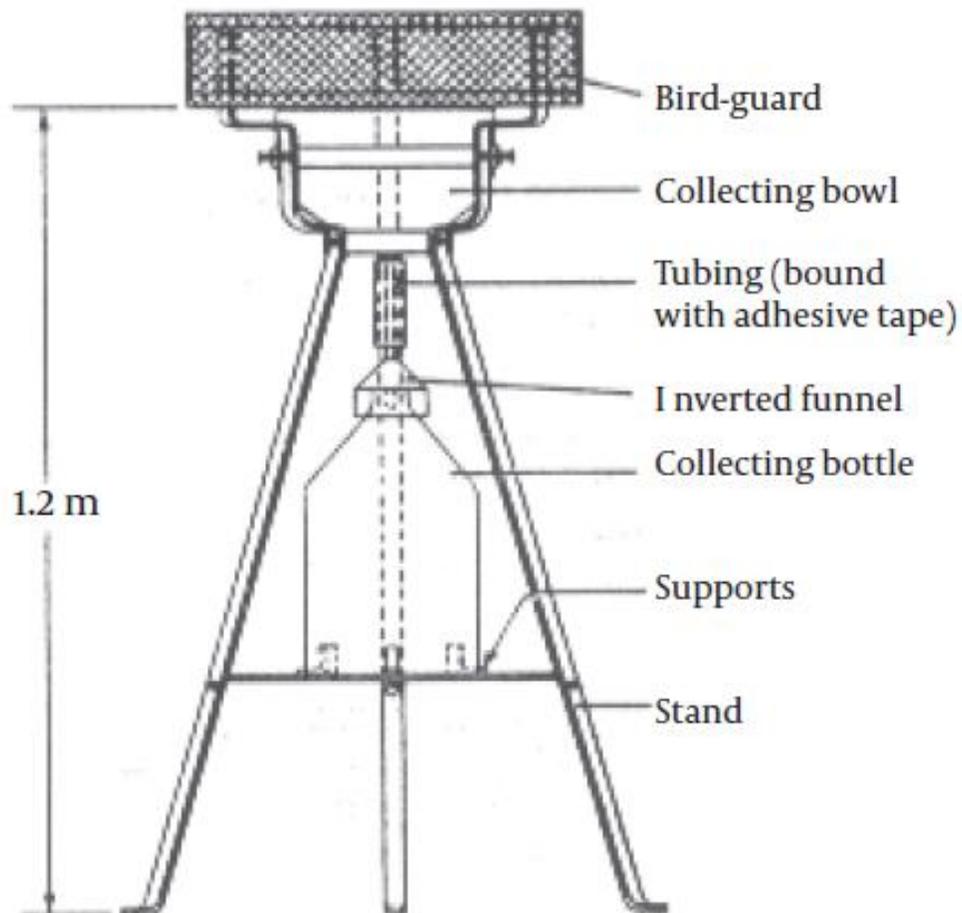


Imagen No. 7 – Detalle de un muestreador de alto volumen (Fuente: BGI Incorporated. www.bgiusa.com)

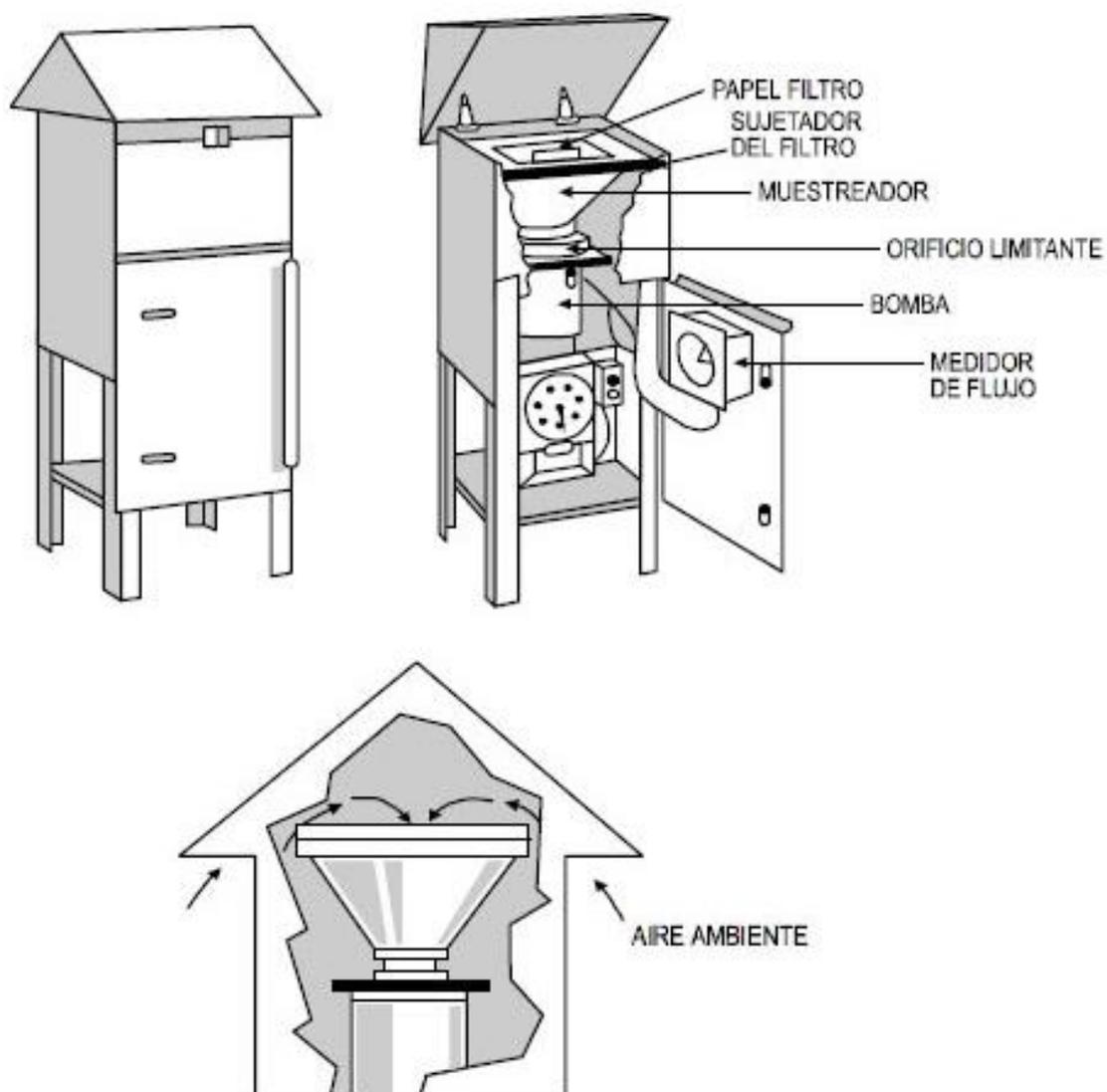


Imagen No. 8 - Equipo de atenuación beta de C14 de Thermo Scientific (Fuente: Thermo Fisher Scientific Inc., www.thermoscientific.com)



Imagen No. 9 - Equipo de medición en tiempo real de Thermo Scientific (Fuente: Thermo Fisher Scientific Inc., www.thermoscientific.com)



13.2 Métodos de Referencia aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, para PM_{2.5} (Fecha de actualización: 27 de junio de 2013).

List of Designated Reference and Equivalent Methods, June 27, 2013, Page 10

Particulate Matter – PM_{2.5}

Andersen Model RAAS2.5-200 PM_{2.5} Ambient Audit Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0299-128

“Andersen Instruments, Incorporated Model RAAS2.5-200 PM_{2.5} Audit Sampler,” configured as a PM_{2.5} reference method and operated with software (firmware) version 4B, 5.0.1 - 6.09, 6.0A, or 6.0B, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, and in accordance with the Model RAAS2.5-200 Operator’s Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 64, page 12167, 03/11/1999

BGI Inc. Models PQ200 or PQ200A PM_{2.5} Ambient Fine Particle Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0498-116

“BGI Incorporated Models PQ200 and PQ200A PM_{2.5} Ambient Fine Particle Sampler,” operated with firmware version 3.88 or 3.89R, for 24-hour continuous sample periods, in accordance with the Model PQ200/PQ200A Instruction Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L, and with or without the optional Solar Power Supply or the optional dual-filter cassette (P/N F-21/6) and associated lower impactor housing (P/N B2027), where the upper filter is used for PM_{2.5}. The Model PQ200A is described as a portable audit sampler and includes a set of three carrying cases.

Federal Register: Vol. 63, page 18911, 04/16/1998

BGI Inc. Models PQ200-VSCC™ or PQ200A-VSCC™ PM_{2.5} Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0498-116 or Manual Equivalent Method: EQPM-0202-142

“BGI Incorporated Models PQ200-VSCC™ or PQ200A-VSCC™ PM_{2.5} Ambient Fine Particle Sampler,” configured with a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone particle size separator and operated with firmware version 3.88, 3.91, 3.89R, or 3.91R, for 24-hour continuous sample periods, in accordance with the Model PQ200/PQ200A Instruction Manual and VSCC™ supplemental manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L, and with or without the optional Solar Power Supply or the optional dual-filter cassette (P/N F-21/6) and associated lower impactor housing (P/N B2027), where the upper filter is used for PM_{2.5}. The Model PQ200A VSCC™ is described as a portable audit sampler and includes a set of three carrying cases.

Federal Register: Vol. 67, page 15567, 04/02/2002

Graseby Andersen Model RAAS2.5-100 PM_{2.5} Ambient Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0598-119

“Graseby Andersen Model RAAS2.5-100 PM_{2.5} Ambient Air Sampler,” operated with software version 4B, 5.0.1 - 6.09, 6.0A, or 6.0B, configured for “Single 2.5” operation, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, and in accordance with the Model RAAS2.5-100 Operator’s Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 63, page 31991, 06/11/1998

Graseby Andersen Model RAAS2.5-300 PM_{2.5} Sequential Ambient Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0598-120

“Graseby Andersen Model RAAS2.5-300 PM_{2.5} Sequential Ambient Air Sampler,” operated with software version 4B, 5.0.1 - 6.09, 6.0A, or 6.0B, configured for “Multi 2.5” operation, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, and in accordance with the Model RAAS2.5-300 Operator’s Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 63, page 31991, 06/11/1998

Grimm Model EDM 180 PM_{2.5} Monitor

Automated Equivalent Method: EQPM-0311-195

“Grimm Technologies, Inc. Model EDM 180 PM_{2.5} or Tisch Environmental TE-EDM 180 PM_{2.5} Monitor,” light scattering continuous ambient particulate monitor operated for 24 hours at a volumetric flow rate of 1.2 L/min, configured with a Nafion®-type air sample dryer, complete for operation with firmware version 7.80 or later, in accordance with the Grimm Technologies, Inc. Model EDM 180 Operation and Instruction Manual. The optional graphic presentation can be made with the software model 1.177 version 3.30 or later.

Federal Register: Vol. 76, page 15974, 03/22/2011

Latest Modification: 01/2012

Met One BAM-1020 Monitor – PM_{2.5} FEM Configuration, Horiba APDA-371– PM_{2.5} Configuration, or Ecotech Spirant BAM1100

Automated Equivalent Method: EQPM-0308-170

“Met One Instruments, Inc. BAM-1020 Beta Attenuation Mass Monitor – PM_{2.5} FEM Configuration, Horiba Instruments APDA-371 Beta Attenuation Mass Monitor – PM_{2.5} FEM Configuration, or Ecotech Spirant BAM1100”, configured with the standard BX-802 EPA PM₁₀ inlet (or alternative louvered PM₁₀ inlet meeting 40 CFR 50 Appendix L specifications) and with a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone particle size separator, operated for 24 1-hour average measurements with firmware revision 3.2.4 or later, with or without an inlet tube extension (BX-823), with or without external enclosures BX-902 or BX-903 and equipped with BX-596 ambient temperature and barometric pressure combination sensor, internal BX-961 automatic flow controller operated in Actual (volumetric) flow control mode, the standard BX-802 EPA PM₁₀ inlet head and a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone (VSCC-A), BX-827 (110V) or BX-830 (230V) Smart Inlet Heater, with the heater RH set to 35% and the temperature control set to "off", the 8470-1 revision D or later tape control transport assembly with close geometry beta source configuration, used with standard glass fiber filter tape, COUNT TIME parameter set for 8 minutes, the SAMPLE TIME parameter set for 42 minutes, BX-302 zero filter calibration kit required and with or without BX-970 touch-screen display with USB interface. Instrument must be operated in accordance with the BAM 1020 Particulate Monitor operation manual, revision F or later, the Horiba APDA-371 Monitor operation manual or the Ecotech Spirant BAM Manual (rev. A or later), as appropriate, and the VSCC™ supplemental manual.

Federal Register: Vol. 73, page 13224, 03/12/2008

Latest modifications: 7/2010; 8/2010; 8/2012

Opsis SM200- Dust Monitor

Automated Equivalent Method: EQPM-0812-203

“Opsis SM200- Dust Monitor” configured for PM_{2.5} with the US EPA PM₁₀ inlet specified in 40 CFR 50 Appendix L, followed by a BGI Inc. Very Sharp Cut Cyclone (VSCC™) particle size separator, operated for a 24-hour continuous sample period at a total actual flow rate of 16.67 L/min. using 47mm PTFE membrane filters, a TS200 temperature stabilizer and software version 1.04.16 or later, in accordance with the Opsis SM200 Dust Monitor Operation and Instruction Guide.

Federal Register: Vol. 77, page 55832, 09/11/2012

Rupprecht & Patashnick Partisol®-FRM Model 2000 PM_{2.5} Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0498-117

“Rupprecht & Patashnick Company, Incorporated Partisol®-FRM Model 2000 PM_{2.5} Air Sampler,” operated with software versions 1.102 - 1.202, with either R&P-specified machined or molded filter cassettes, with or without the optional insulating jacket for cold weather operation, for 24-hour continuous sample periods, in

accordance with the Model 2000 Instruction Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 63, page 18911, 04/16/1998

Rupprecht & Patashnick Partisol® Model 2000 PM_{2.5} Audit Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0499-129

“Rupprecht & Patashnick Company, Inc. Partisol® Model 2000 PM_{2.5} Audit Sampler,” configured as a PM_{2.5} reference method and operated with software (firmware) version 1.2 - 1.202, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, in accordance with the Partisol® Model 2000 Operating Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 64, page 19153, 04/19/1999

Rupprecht & Patashnick Partisol® Model 2000 PM_{2.5} FEM Audit Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0499-129 or Manual Equivalent Method: EQPM-0202-144

“Rupprecht & Patashnick Co., Inc. Partisol® Model 2000 PM_{2.5} FEM Audit Sampler,” configured with a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone particle size separator, and operated with software (firmware) version 1.2 - 1.202, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, in accordance with the Partisol® Model 2000 Operating Manual and VSCC™ supplemental manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 67, page 15567, 04/02/2002

Rupprecht & Patashnick Partisol®-Plus Model 2025 Sequential Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0498-118

“Rupprecht & Patashnick Company, Incorporated Partisol®-Plus Model 2025 PM_{2.5} Sequential Air Sampler,” operated with any software version 1.003 through 1.4.16, with either R&P-specified machined or molded filter cassettes, for 24-hour continuous sample periods, in accordance with the Model 2025 Instruction Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 63, page 18911, 04/16/1998

Teledyne Model 602 BetaPLUS Particle Measurement System or SWAM 5a Dual Channel Monitor

Automatic Equivalent Method: EQPM-0912-204

“Teledyne Model 602 BetaPLUS Particle Measurement System” or “SWAM 5a Dual Channel Monitor” configured for 1-hour measurements of PM_{2.5} by beta attenuation, on either a single (Line A or B) or both sampling lines (Line A and B) simultaneously, using 47 mm glass fiber filters, at a sample flow set to 16.67 liters/min and software version 05-02.07.63 or later and with an inlet system comprised of a PM₁₀ pre-impactor inlet (based on European PM₁₀ inlet design) combined with a BGI VSCC™ PM_{2.5} cyclone separator. Operated in accordance with the Teledyne Model 602 BetaPLUS Particle Measurement System Operation Manual.

Federal Register: Vol. 77, page 60985, 10/5/2012

Thermo Electron Model RAAS2.5-100 FEM PM_{2.5} Ambient Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0598-119 or Manual Equivalent Method: EQPM-0804-153

“Thermo Electron Corporation Model RAAS2.5-100 FEM PM_{2.5} Ambient Air Sampler,” configured with a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone particle size separator and operated with software version 06.0B.00 configured for “Single 2.5” operation, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, in accordance with the Model RAAS2.5-100 FEM Operator’s Manual and VSCC™ supplemental manual, and in accordance with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 69, page 47924, 08/06/2004

Thermo Electron Model RAAS2.5-200 FEM PM_{2.5} Audit Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0299-128 or Manual Equivalent Method: EQPM-0804-154

“Thermo Electron Corporation Model RAAS2.5-200 FEM PM_{2.5} Audit Air Sampler,” configured with a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone particle size separator and operated with software version 06.0B.00, for 24-

hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, in accordance with the Model RAAS2.5-200 FEM Operator's Manual and VSCC™ supplemental manual, and in accordance with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 69, page 47924, 08/06/2004

Thermo Electron Model RAAS2.5-300 FEM PM_{2.5} Sequential Ambient Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0598-120 or Manual Equivalent Method: EQPM-0804-155

“Thermo Electron Corporation Model RAAS2.5-300 FEM PM_{2.5} Sequential Ambient Air Sampler,” configured with a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone particle size separator and operated with software version 06.0B.00 configured for “Multi 2.5” operation, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, in accordance with the Model RAAS2.5-300 FEM Operator's Manual and VSCC™ supplemental manual, and in accordance with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 69, page 47924, 08/06/2004

Thermo Environmental Instruments, Incorporated Model 605 “CAPS” Sampler

Manual Reference Method: RFPS-1098-123

“Thermo Environmental Instruments, Incorporated Model 605 “CAPS” Computer Assisted Particle Sampler,” configured as a PM_{2.5} reference method and operated with software version 1.02A, for 24-hour continuous sample periods, in accordance with the Model 605 Instruction Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 63, page 58036, 10/29/1998

Thermo Scientific Model 5014i or Thermo Scientific FH62C14-DHS Continuous Ambient Particle Monitor Automated Equivalent Method: EQPM-0609-183

“Thermo Scientific Model 5014i or FH62C14-DHS Continuous Ambient Particle Monitor,” operated at a flow rate of 16.67 liters per minute for 24-hour average measurements configured for PM_{2.5} with a louvered PM₁₀ size selective inlet as specified in 40 CFR 50 Appendix L, Figs. L-2 through L-19, a PM_{2.5} BGI Inc. Very Sharp Cut Cyclone (VSCC™) particle size separator, inlet connector, sample tube, DHS heater with 35% RH threshold, mass foil kit, GF10 filter tape, 8-hour filter change, and operational calibration and servicing as outlined in the 5014i Continuous Ambient Particulate Monitor or FH62C14-DHS Continuous Ambient Particulate Monitor operating manual.

Federal Register: Vol. 74, page 28696, 06/17/2009.

Latest modification: 03/2010

Thermo Scientific Model 5030i SHARP Monitor or Model 5030 SHARP Monitor

Automated Equivalent Method: EQPM-0609-184

“Thermo Scientific Model 5030 SHARP Monitor,” operated at a flow rate of 16.67 liters per minute for 24-hour average measurements configured for PM_{2.5} with a louvered PM₁₀ size selective inlet as specified in 40 CFR 50 Appendix L, Figs. L-2 through L-19, a PM_{2.5} BGI Inc. Very Sharp Cut Cyclone (VSCC™) particle size separator, inlet connector, sample tube, DHS heater with 58% RH threshold, mass foil kit, GF10 filter tape, nephelometer zeroing kit, 8-hour filter change, and operational calibration and servicing as outlined in the Model 5030i or Model 5030 SHARP instructional manual.

Federal Register: Vol. 74, page 28696, 06/17/2009

Latest modification: 06/2013

Thermo Scientific TEOM® 1400a Ambient Particular Monitor with Series 8500C FDMS®; Thermo Scientific TEOM® 1405-F Ambient Particular Monitor with FDMS®

Automated Equivalent Method: EQPM-0609-181

“Thermo Scientific TEOM® 1400a Ambient Particular Monitor with Series 8500C FDMS® (Filter Dynamics Measurement System) or Thermo Scientific TEOM® 1405-F Ambient Particular Monitor with FDMS®,” configured for PM_{2.5} with the US EPA PM₁₀ inlet specified in 40 CFR 50 Appendix L, Figs. L-2 thru L-19, followed by a BGI Inc. Very Sharp Cut Cyclone (VSCC™) particle size separator, operated with a total actual

flow of 16.67 L/min., loaded with Series FDMS® 8500 module operating software and an FDMS® kit. TEOM® 1400a with Series 8500C FDMS® operated with firmware version 3.20 and later and TEOM® 1405-F with FDMS® operated with version 1.55 or later and according to the appropriate operating manual.

Federal Register: Vol. 74, page 28696, 06/17/2009

Latest Modification: 09/2010

Thermo Scientific TEOM® 1405-DF Dichotomous Ambient Particular Monitor with FDMS®

Automated Equivalent Method: EQPM-0609-182

“Thermo Scientific TEOM® 1405-DF Dichotomous Ambient Particular Monitor with FDMS®,” configured for dual filter sampling of fine (PM_{2.5}) and coarse particles using the US EPA PM₁₀ inlet specified in 40 CFR 50 Appendix L, Figs. L-2 thru L-19 and a virtual impactor, with a total flow rate of 16.67 L/min, fine sample flow of 3 L/min, and coarse sample flow rate of 1.67 L/min, and operating with firmware version 1.50 and later, operated with or without external enclosures, and operated in accordance with the Thermo Scientific TEOM® 1405-DF Dichotomous Ambient Particulate Monitor Instruction Manual (designated for PM_{2.5} measurements only).

Federal Register: Vol. 74, page 28696, 06/17/2009

Thermo Scientific Partisol® 2000-D Dichotomous Air Sampler or Thermo Fisher Scientific Partisol® 2000i-D Dichotomous Air Sampler

Manual Equivalent Method: EQPS-0509-177

“Thermo Scientific Partisol® 2000-D Dichotomous Air Sampler” or “Thermo Fisher Scientific Partisol® 2000i-D Dichotomous Air Sampler,” configured for dual-filter, single-event sampling of fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{10-2.5}) particles, operated with a U.S. EPA PM₁₀ inlet and using a virtual impactor to separate fine and coarse PM into two samples for collection on two separate filter membranes, for a 24-hour sampling period, in accordance with the Partisol® 2000-D or Partisol® 2000i-D instruction manual, as appropriate. Partisol® 2000i-D operated with firmware version 2.0 or greater.

Federal Register: Vol. 74, page 26395, 06/02/2009

Latest modification: 06/ 2011

Thermo Scientific Partisol®-Plus 2025-D Dichotomous Sequential Air Sampler or Thermo Fisher Scientific Partisol® 2025i-D Dichotomous Sequential Air Sampler

Manual Equivalent Method: EQPS-0509-179

“Thermo Scientific Partisol®-Plus 2025-D Dichotomous Sequential Air Sampler” or “Thermo Fisher Scientific Partisol® 2025i-D Dichotomous Sequential Air Sampler,” configured for dual-filter sampling of fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{10-2.5}) particle components, with a U.S. EPA PM₁₀ inlet and using a virtual impactor to separate the fine and coarse PM into two samples for collection on two separate filter membranes, and operated with the modified filter shuttle mechanism implemented May 31, 2008, and firmware version 1.500 or greater for the *Partisol®-Plus* 2025-D and version 2.0 or greater for the *Partisol® 2025i-D*, for 24-hour continuous sampling periods, in accordance with the Partisol®-Plus 2025-D or *Partisol® 2025i-D* instruction manual, as appropriate.

Federal Register: Vol. 74, page 26395, 06/02/2009

Latest modification: 06/ 2011

Thermo Scientific Partisol® 2000-FRM PM_{2.5} Air Sampler or Thermo Fisher Scientific Partisol® 2000i PM_{2.5} Air Sampler or Rupprecht & Patashnick Partisol®-FRM 2000 PM_{2.5} Air Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0498-117 or Manual Equivalent Method: EQPM-0202-143

“Thermo Scientific Partisol® 2000-FRM PM_{2.5} Air Sampler” or “Thermo Fisher Scientific Partisol® 2000i PM_{2.5} Air Sampler” or “Rupprecht & Patashnick Partisol®-FRM 2000 PM_{2.5} [FEM] Air Sampler configured with a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone particle size separator with either R&P-specified machined or molded filter cassettes, for 24-hour continuous sampling periods, in accordance with the Partisol® 2000-FRM or Partisol®2000i Instruction Manual, as appropriate, and VSCC™ supplemental manual. Partisol® 2000-FRM operated with software versions 1.102 through 1.202 and Partisol® 2000i with firmware version 2.0 or greater. Method is operated with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L, and with or without the optional insulating jacket for cold weather operation.

Federal Register: Vol. 67, page 15567, 04/02/2002
Latest modification: 06/2011

Thermo Scientific Partisol®-Plus 2025 Sequential PM_{2.5} Air Sampler or Thermo Fisher Scientific Partisol® 2025i Sequential PM_{2.5} Air Sampler or Rupprecht & Patashnick Partisol®-Plus 2025 PM_{2.5} Sequential Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0498-118 or Manual Equivalent Method: EQPM-0202-145

“Thermo Scientific Partisol®-Plus 2025 PM_{2.5} Sequential Air Sampler” or “Thermo Fisher Scientific Partisol® 2025i PM_{2.5} Sequential Air Sampler” or “Rupprecht & Patashnick Partisol®-Plus 2025 PM_{2.5} (FEM) Sequential Air Sampler,” configured with a BGI VSCC™ Very Sharp Cut Cyclone particle size separator with either R&P-specified machined or molded filter cassettes, for 24-hour continuous sampling periods. Partisol®-Plus 2025 to be operated with any software version 1.003 through 1.5 and Partisol® 2025i with firmware version 2.0 or greater, and with the modified filter shuttle mechanism. Method to be operated in accordance with the Partisol®-Plus 2025 or Partisol® 2025i instruction manual, as appropriate, with the VSCC™ supplemental manual, and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 67, page 15567, 04/02/2002
Latest modification: 06/2011

URG-MASS100 Single PM_{2.5} FRM Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0400-135

“URG-MASS100 Single PM_{2.5} FRM Sampler,” operated with software (firmware) version 4B or 5.0.1, configured for “Single 2.5” operation, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, and in accordance with the URG-MASS100 Operator’s Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 65, page 26603, 05/08/2000

URG-MASS300 Sequential PM_{2.5} FRM Sampler

Manual Reference Method: RFPS-0400-136

“URG-MASS300 Sequential PM_{2.5} FRM Sampler,” operated with software (firmware) version 4B or 5.0.1, configured for “Multi 2.5” operation, for 24-hour continuous sample periods at a flow rate of 16.67 liters/minute, and in accordance with the URG-MASS300 Operator’s Manual and with the requirements and sample collection filters specified in 40 CFR Part 50, Appendix L.

Federal Register: Vol. 65, page 26603, 05/08/2000

13.3 Manual del equipo OMNI frm

1) Para encender el equipo presione el botón I/O. Aparecerá la pantalla de iniciación en la que aparece el número de serie y la versión del software instalado en el equipo. Después de la pantalla de inicio aparece la pantalla del menú principal de operación.



2) Para desplazarse por las opciones del menú se utilizan las teclas *up* y *down*.

Para ingresar a cualquiera de las opciones del menú, solo coloca la flecha → a la izquierda de la opción del menú y se presiona la tecla *enter*.



Run Now: inicia el funcionamiento de la bomba de succión para iniciar el monitoreo.

Run Programmed: despliega las opciones del menú de programación del equipo.

Set Fcns/Cal: despliega las opciones de programación de unidades de trabajo, fecha y hora, y calibración del equipo.

Antes de usar el OMNI ftr debe programarse la fecha, hora y preferencias.

3) Escoger la función *Set Fcns/Cal*, se desplegará el menú:

Date and Time: para colocar la fecha y hora actual.

Cal.Temp.: ajusta la temperatura para hacerla coincidir con la lectura del calibrador de temperatura.

Cal. BP.: ajusta la presión barométrica para hacerla coincidir con la lectura del calibrador de presión barométrica.



Cal. Flow rate: ajusta el flujo para hacerlo coincidir con la lectura de calibrador de flujo.

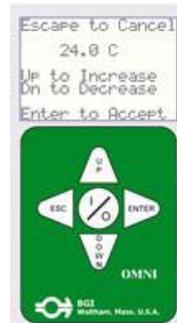
Select BP unit: para colocar las unidades de presión barométrica en las que se desea que trabaje el OMNI ftr.

4) Escoger la función *Date and Time*, se desplegará en menú:

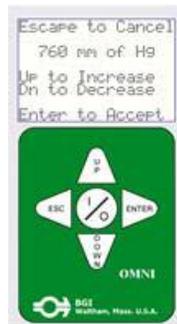
En el inciso *2007 Year* presionar el botón *Enter*, el inciso comenzará a titilar. Utilizar las teclas *Up* y *Down* para colocar el año correcto (si mantiene presionada la tecla, se acelera el cambio en la numeración). Luego presione la tecla *Enter* para aceptar el valor colocado; la flecha indicadora (→) automáticamente pasará al siguiente inciso. En el inciso *06 Month*, realizar la misma operación. Al finalizar de ajustar la fecha y la hora, seleccionar *Done*, para regresar al menú *Set Fcns/Cal.*



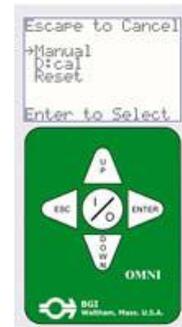
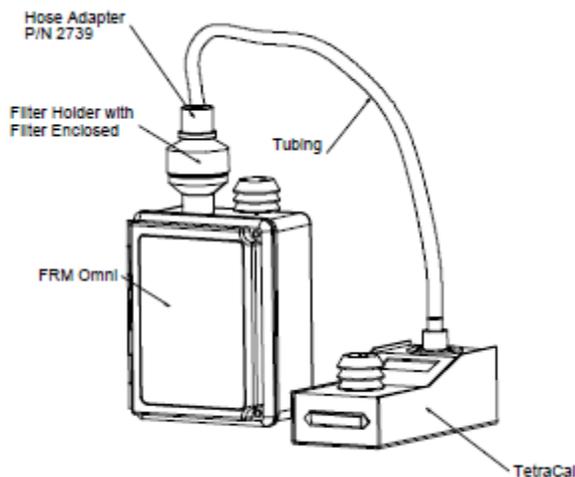
5) Escoger la función *Cal. Temp* se desplegará la siguiente pantalla: Compare la temperatura del equipo Omni con la del equipo Tetracal u otro estándar de temperatura. Si difieren, cambie el valor de la temperatura del Omni *presionando* las teclas *Up* y *Down*. Luego presione la tecla *Enter* para aceptar el valor colocado. Se regresará al menú *Set Fcns/Cal.*



6) Escoger la función *Cal. BP* se desplegará la siguiente pantalla: Compare la presión barométrica del equipo Omni con la del equipo Tetracal u otro estándar de presión barométrica. Si difieren, cambie el valor de la presión barométrica del Omni *presionando* las teclas *Up* y *Down*. Luego presione la tecla *Enter* para aceptar el valor colocado. Se regresará al menú *Set Fcns/Cal.*



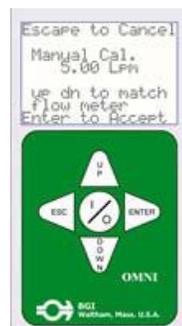
7) Para la calibración del flujo escoger la función *Cal. Flow Rate* se desplegará la siguiente pantalla: Conectar el equipo Omni al calibrador TetraCal de la forma que se muestra en la siguiente imagen:



Para la calibración es necesario colocar en el equipo un filtro acorde al tamaño de partícula que vamos a monitorear, en este caso, un filtro de PM2.5. El equipo TetraCal cuenta con tres tubos de Venturi calibrados para tres diferentes rangos de flujo, escoger el Venturi que incluya al flujo de trabajo del equipo Omni: 5 LPM. Dejar estabilizar el la temperatura y presión del TetraCal, dejándolo a la par del Omni por lo menos 10 minutos.

Utilizando las teclas *Up* y *Down*, escoger en el menú la opción *Manual*, esto hará que automáticamente la bomba del equipo Omni empiece a funcionar y aparecerá la siguiente pantalla:

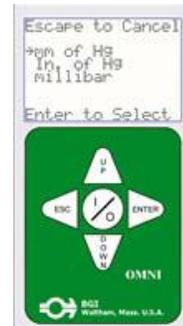
Dejar que las lecturas de medición de flujo se estabilicen y utilizando las teclas *Up* y *Down* colocar en el equipo Omni el



mismo flujo que indica el equipo Tetracal. Para terminar presionar la tecla *Enter*. Esto hará que se regrese a la pantalla anterior.

8) Escoger la función *Select BP unit* para escoger las unidades en las que se prefiere que se muestre la presión barométrica, se desplegará la siguiente pantalla:

Utilizando las teclas *Up* y *Down* colocarle en mmHg, inHg o milibar. Presionar la tecla *Enter* para aceptar las unidades y regresar a la pantalla de funciones y calibración. Presionando la tecla *Esc*, se regresará a la pantalla principal.



9) Estando en la pantalla principal, escoja el inciso *Run Now* y la bomba de succión empezará a funcionar iniciándose así una medición. Durante la medición se desplegará la siguiente pantalla: En esta pantalla se indica el flujo, la temperatura y la presión barométrica de la medición en el momento. Indica también el estado de la batería y el tiempo que va de medición en el momento.



10) Para detener la medición presionar la tecla *Enter*, automáticamente la bomba dejara de funcionar y se desplegará la siguiente pantalla:

En esta se muestra el día y hora de inicio y final de la medición, el flujo promedio de la medición, el volumen de aire que paso por el filtro durante todo el tiempo de la medición y el volumen de aire a temperatura y presión estándar.



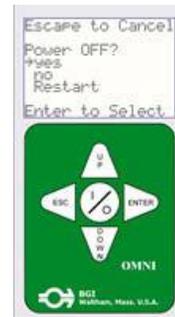
11) Al terminar la medición presionar la tecla *I/O*, esto mostrará la pantalla de apagado del equipo:

Usando las teclas *Up* y *Down*, escoger:

yes, para salvar la información del monitoreo y apagar el equipo.

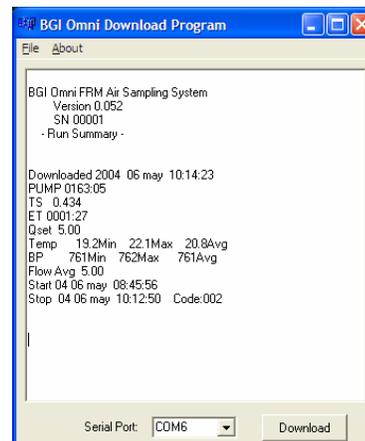
no, para regresar a la pantalla de medición.

Restart, para continuar con la medición.



12) Para bajar la información del último monitoreo del equipo Omni, se debe conectar a la computadora. Para esto se utiliza un cable serial con conector RS232 de 9 pines, que se conecta al puesto serial del equipo, y una conexión USB para conectar a la computadora. Al conectarse por primera vez, se instalará el programa para bajar los datos y se colocará un icono en el escritorio de la computadora.

Dando doble clic al icono en el escritorio, se abrirá la pantalla del programa. Dando clic en el botón *Download*, aparecerán los datos del último monitoreo en la ventana. Cualquier información adicional a los datos de monitoreo puede agregarse en la ventana y quedará grabado.



Para guardar el archivo, dar clic en *File*, esto desplegará un menú, luego dar clic en *Save As*, aparecerá una ventana, en la que se debe indicar el lugar donde se guardará el archivo y el nombre que se le dará. Dando clic en el botón *Save* se guardará un documento de texto (.txt).

