

Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas

Angélica Legarreta Perusquia¹, Alba Yadira Corral Avitia¹, Marcos Delgado Rios¹, Jonatan Torres Pérez¹,
Juan Pedro Flores Marguez¹

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

Las poblaciones se encuentran expuestas a material particulado (MP) y metales pesados en aire, algunas veces por encima de los niveles permitidos por la legislación de cada país y pueden implicar riesgos para la salud humana. Se realizó una revisión de literatura sobre tendencias y comportamientos espacio-temporales de MP y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. Se resumen las principales fuentes de emisión de estos contaminantes atmosféricos y las diversas tecnologías para su muestreo y análisis. Con base en la literatura revisada se determinaron algunas áreas de oportunidad para futuras investigaciones en México.

Palabras clave: Material particulado, metales pesados.

Introducción

Las partículas son uno de los seis “contaminantes criterio” y su medición es necesaria para el desarrollo de estándares tanto ambientales como para la protección de la salud humana (INECC, 2013).

El origen del MP puede ser natural y antropogénico y se clasifican principalmente por su tamaño. Entre las fuentes naturales de MP se encuentran la polinización de las plantas, volcanes, calles sin pavimentar e incendios forestales. La quema de combustibles fósiles para transporte, industrias y producción de energía son los principales ejemplos de contaminación antropogénica. Por su tamaño se clasifican en dos grupos principales: PM₁₀ (fracción inhalable o gruesa) las cuales tienen un tamaño mayor a 2.5 y menor a 10 micrómetros (µm) y PM_{2.5} (fracción torácica o fina) que son

partículas de diámetro menor o igual a 2.5 µm (EPA, 2013; WHO, 2003).

Existe una gran variedad de efectos a la salud debidos a la exposición a PM₁₀ y PM_{2.5} y toda la población puede verse afectada (OMS, 2006). Las muertes prematuras, ataques de asma, alergias, enfermedades cardiovasculares y la reducción de la tasa de espiración máxima en niños son algunos de los efectos de la exposición a MP (Hong et al., 2007; Kim et al., 2015). En el 2013, una evaluación realizada por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) concluyó que la contaminación del aire exterior y el MP están considerados como causas de cáncer, especialmente de pulmón (IARC, 2013). Otros estudios reportan que la exposición a MP puede ser un factor de

riesgo para contraer diabetes mellitus tipo 2 (Balti et al., 2014).

Los ecosistemas también se ven afectados por MP y metales pesados. La acidificación y saturación de nitrógeno pueden causar efectos en los ecosistemas debido a que dañan la biodiversidad de microorganismos presentes en la rizosfera y los ciclos de los nutrientes. Los metales pesados pueden afectar el crecimiento de la vegetación (Grantz et al., 2003).

El objetivo de este artículo fue revisar la literatura disponible sobre estudios hechos en México referentes a MP, comprendiendo PST (partículas suspendidas totales), PM₁₀, PM_{2.5} y metales pesados asociados. Los estudios incluidos fueron publicaciones del año 2000 en adelante. En México hay disponibles pocas investigaciones tanto de MP como de metales pesados en aire.

Resultados

Material particulado en ciudades mexicanas

En Mayo del 2014 el Gobierno Federal de México presentó el Proyecto de Norma para modificar la NOM-025-SSA1-1993 y reducir los límites máximos permisibles (LMP) de PM₁₀ y PM_{2.5} en México. El 8 de

Agosto del 2014 el proyecto fue aprobado. En la Tabla 1 se observan los LMP de la norma vigente (derecha) y los LMP en la norma anterior (izquierda) para PM₁₀ y PM_{2.5}. Los límites de 24 h están establecidos para exposición aguda y los anuales para crónica.

Tabla 1. Límites máximos permisibles de PM₁₀ y PM_{2.5} en las Normas Oficiales Mexicanas

PARÁMETRO	NOM-025-SSA1-1993	NOM-025-SSA1-2014
PM ₁₀	Límite de 24 horas: 150 µg/m ³ Límite anual: 50 µg/m ³	Límite de 24 horas: 50 µg/m ³ Límite anual: 35 µg/m ³
PM _{2.5}	Límite de 24 horas: 65 µg/m ³ Límite anual: 15 µg/m ³	Límite de 24 horas: 30 µg/m ³ Límite anual: 10 µg/m ³

Las PST aparecían en la NOM-025-SSA1-1993 y su límite era de 210 µg/m³, sin embargo, la actualización a la norma no considera las PST, debido a que estudios recientes han revelado que las PM₁₀ y las PM_{2.5} son las de relevancia para el cuidado de la salud de la población.

En esta sección se describen estudios sobre PST, PM₁₀ y las PM_{2.5} (Tabla 2) en diversas ciudades de México. Las ciudades se encuentran ordenadas de acuerdo a su densidad poblacional de forma decreciente. En el Tabla 2 se resumen los estudios encontrados sobre MP realizados en diversas ciudades mexicanas. Se describen los tamaños de partículas

analizados, los tipos de estación de muestreo y equipos utilizados para su determinación, los periodos de los estudios y los principales hallazgos.

Ciudades con población mayor a 1 000 000 habitantes

La Ciudad de México (D.F.) cuenta con una población de 8 851 080 habitantes. Múgica y colaboradores en el 2002 reportaron que de cinco estaciones de monitoreo abordadas en esta investigación, Xalostoc, cuenta con alta actividad industrial y mostró los niveles más altos tanto de TSP como de PM_{10} . Los análisis por microscopia electrónica mostraron partículas naturales con metales pesados adheridos además de partículas con alto contenido de carbón posiblemente provenientes de quema de combustibles (Múgica *et al.*, 2002). Por otra parte, Vega y colaboradores (2002) reportaron una caracterización espacio-temporal de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para un muestreo de un mes en el D.F. Realizaron dos tipos de muestreos, de 6 y de 24 h; los de 6 h se sumaron para completar las 24 h del día. Pudieron observar que los muestreos de 6 h representan mejor la variabilidad temporal de las concentraciones. Las principales fuentes de contaminación que identificaron fueron polvo y procesos de combustión. Posteriormente, se realizó un análisis de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el que se evaluó el periodo entre el 2000 y 2002. Se tomaron en cuenta tres sitios de muestreo: Xalostoc (industrial), Merced (comercial) y Pedregal (residencial). Las concentraciones más altas de PM se encontraron en Xalostoc (Vega *et al.*, 2004). El estudio más reciente sobre la

Ciudad de México se reportó en el 2014 en el que se analizaron datos de 14 estaciones automáticas de PM_{10} del 2000 al 2011 mostró que la media anual estuvo muy cercana al límite establecido en la normatividad mexicana ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Benítez *et al.*, 2014).

Tijuana, en Baja California, cuenta con una población de 1 559 683 habitantes. Minguillón y colaboradores en el 2014 reportaron que se colectaron muestras de dos sitios urbanos en Tijuana: uno de alto tráfico vehicular (Parque Morelos (PQM)) y uno correspondiente a un área industrial (Metales y Derivados (MYD)). La campaña se llevó a cabo en un periodo donde las concentraciones de MP son bajas. Las $PM_{2.5}$ fueron atribuidas a industrias por el contenido de carbono elemental y la fracción mineral (PM_{10}) a resuspensión de polvos de caminos y fuentes naturales (Minguillón *et al.*, 2014).

Morales y colaboradores en el 2014, reportaron un estudio realizado en Puebla, Puebla la cual tiene una población de 1 539 819 habitantes. La estación en la que se obtuvieron las concentraciones más altas de PM_{10} fue debido a su cercanía a carreteras a la salida sur de la ciudad. Los altos niveles de partículas sugieren exposición ocupacional crónica a las partículas durante la respiración. Los niveles de PM_{10} más altos se encontraron en verano y primavera (Morales *et al.*, 2014).

En Guadalajara, Jalisco (1 495 189 habitantes) las PM_{10} se concentraron mayormente en los meses en los que las temperaturas son bajas, debido a una baja humedad en el ambiente, lo cual evita la

dispersión del MP. El MP era considerado el contaminante de mayor importancia en esta ciudad debido a que sus concentraciones se mantenían constantes y eran altas por lo que implicaban riesgos a la salud (Ramírez *et al.*, 2009). Posteriormente, en un estudio realizado en el 2014 por Benítez y colaboradores sobre las tendencias a largo plazo de PM₁₀ en tres ciudades de México, se observó que en Guadalajara la concentración media anual de PM₁₀ se redujo en un 27.5% entre el 2000 y el 2010. De acuerdo a este estudio, la normatividad se cumple en Guadalajara desde el 2006 (Benítez *et al.*, 2014).

Monterrey, Nuevo León, cuenta con una población de 1 135 550 habitantes. Una investigación realizada por González y colaboradores (2011) encontró niveles altos de PM₁₀ los cuales rebasaron el límite anual de la NOM-025-SSA1-1993. El área donde se encontraron las mayores concentraciones se caracteriza por tener alto tráfico vehicular y actividades industriales (González *et al.*, 2011). El polvo proveniente de calles es una de las principales fuentes de PM₁₀ durante el día y el nivel más alto de concentración se alcanza a las 10 de la mañana debido a actividades antropogénicas. Monterrey presentó niveles de PM₁₀ más altos que la Ciudad de México en un 37% y alrededor de un 42% que la ciudad de Guadalajara (Benítez *et al.*, 2014).

Ciudades de 1 000 000 a 500 000 habitantes

En Mexicali, Baja California, ciudad que cuenta con 936 826 habitantes, se reportaron bastantes excedencias a la

normatividad de 24 h en los periodos evaluados. En verano en la zona urbana, Canales y colaboradores reportaron en el 2014, 8 excedencias y en el área rural fueron 7. Se concluyó que la calidad del aire en Mexicali no es satisfactoria ni por regiones (urbana y rural) ni en las temporadas (invierno y verano). Gran parte de las partículas son materia orgánica en la zona urbana y material geológico en la zona rural en invierno (Canales *et al.*, 2014).

Campos y colaboradores (2007) realizaron un estudio sobre la concentración y morfología de PM₁₀ en Chihuahua, Chihuahua (819 543 habitantes), ciudad que se caracteriza por tener un clima desértico. La composición de partículas fue predominantemente de dos tipos: partículas pequeñas con alto contenido de carbón y partículas finas con alto contenido de metales. Los datos se dividieron en épocas otoño-invierno (OI) y primavera-verano (PV); OI presentó niveles más altos de partículas, similar a lo reportado por Canales y colaboradores, en la ciudad de Mexicali. Los días de la semana fueron clasificados entre días laborables y no laborables; los laborables mostraron concentraciones mayores de PM₁₀. Varios de los sitios de muestreo excedieron las normas de calidad del aire respecto a PM₁₀ y se observó que hay una gran variación espacial de las concentraciones de las partículas (Campos *et al.*, 2007).

En la ciudad de Hermosillo, Sonora, la cual cuenta con 784 342 habitantes, se reportaron excedencias en los promedios de 24 h y anuales de PST en las 3 estaciones por lo que no se cumplió con la

normatividad mexicana. Los principales aportes de partículas se derivan del tráfico vehicular en calles sin pavimentar y terrenos baldíos. La calidad del aire en Hermosillo, Sonora según este estudio resultó ser no satisfactoria debido a las altas concentraciones de MP representado como PST (Cruz *et al.*, 2013).

En un estudio realizado por Pineda y colaboradores (2014) en San Luis Potosí, San Luis Potosí, la cual tiene 772 604 habitantes, se reportaron análisis mediante microscopia electrónica de barrido. Las partículas observadas mostraron polen, esporas y minerales (fuentes naturales) y morfologías irregulares o esféricas asociadas a metales pesados (origen antropogénico). Se utilizó el Modelo de Mesoescala Versión 5 (MM5 por sus siglas en inglés) acoplado al Modelo de Multiescala de Química del Clima (MCCM por sus siglas en inglés) para obtener información sobre la distribución de las partículas de acuerdo a condiciones meteorológicas. La modelación numérica fue una herramienta para concluir que la circulación del aire en San Luis Potosí disminuye la calidad del aire. El promedio anual de las PM_{10} ($107.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sobrepasó la NOM-035-SSA1-1993 y el estándar de la OMS (Pineda *et al.*, 2014).

Ciudades con menos de 500, 000 habitantes

Los niveles de PM_{10} en Colima, Colima (146 904 habitantes) fueron evaluados en un sitio rural. El estudio se dividió en una temporada fría (Octubre-Enero 2007) en la que se observaron niveles más bajos de

PM_{10} y una temporada caliente (Marzo-Mayo 2007) en la que los niveles concurren más altos. Aproximadamente un 50% de las muestras sobrepasó el límite establecido por la OMS ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El análisis de reparto de fuentes de emisión mostró que los mayores niveles de PM_{10} son de contaminación regional (resuspensión de polvo, la cercanía al volcán de Colima, y la ocurrencia de incendios forestales), seguido por emisiones industriales, quema de combustibles, tráfico vehicular, entre otros (Campos *et al.*, 2011).

En la zona norte de Chiapas se analizó por Ramos y colaboradores el periodo de enero del 2001 a febrero del 2005, quienes lo reportaron en el 2010, para 3 estaciones de monitoreo. Posterior a esa fecha las estaciones de monitoreo automático en Chiapas dejaron de funcionar. Uno de los hallazgos de este estudio fue la correlación negativa de PM_{10} con humedad relativa y presión, y positiva con radiación solar. En dos de las estaciones de monitoreo se excedieron los límites de 24 h establecidos en la NOM (Ramos *et al.*, 2010).

Martínez y colaboradores reportaron un estudio por microscopia electrónica de barrido en muestras de Tlaxcoapan, Hidalgo (26 758 habitantes). Indican que la morfología de las PM_{10} es debida a polvo mineral. Los análisis espectrales demostraron la presencia de C, O, Mg y Si, por lo que se cree que el MP se encuentra asociado a la explotación de cantera de caliza ubicada a 10 km de distancia del área de estudio (Martínez *et al.*, 2010).

Tabla 2. Investigaciones sobre TSP, PM₁₀ y PM_{2.5} en ciudades mexicanas

Ciudad	Carácter de las partículas colectadas	Metodología de muestreo, número de estaciones y periodo evaluado	Tipo de Análisis	Hallazgos	Referencia
Tijuana, Baja California	PM ₁₀ PM _{2.5}	Equipos de alto volumen 2 estaciones de monitoreo Período 17 mayo – 27 junio 20	Químico y gravimétrico	Los principales componentes de las PM ₁₀ fueron minerales y materia orgánica, sal marina, sulfatos no marinos y nitratos.	Minguillón <i>et al.</i> , 2014
Hermosillo, Sonora	TSP	Equipos de alto volumen 3 estaciones de monitoreo Periodo: junio 2001 a mayo 2002.	Gravimétrico Digestión ácida para metales pesados	Debe atenderse el riesgo por exposición crónica. La zona Noroeste fue la más contaminada y es la zona que tiene menor cobertura de pavimento.	Cruz <i>et al.</i> , 2013
Monterrey, Nuevo León	PM ₁₀	TEOM 1405-DF 5 estaciones automáticas Periodo: 2006 – 2008	Gravimétrico	En todas las zonas de monitoreo se excedió la NOM-025-SSA1-1993 (50 µg/m ³). Para todas las estaciones de monitoreo el invierno fue la temporada más contaminada por PM10. El verano tuvo los niveles más bajos.	González <i>et al.</i> , 2011
Puebla. Puebla	PM ₁₀ PM _{2.5}	Beta Andersen Model FH62C14 4 estaciones de monitoreo continuo	Gravimétrico	Los altos niveles de PM ₁₀ sugieren una exposición ocupacional crónica. La estación con niveles más altos fue debida a la proximidad con la carretera que lleva a ciudades del sur.	Morales <i>et al.</i> , 2014
Mexicali, Baja California	PM ₁₀	Bajo volumen Minivol Airmetrics Dos sitios: urbano y rural Dos temporadas: Invierno y verano	Gravimétrico Espectroscopia de rayos X (EDS) Transmitancia óptica Cromatografía de iones	Invierno: 12 excedencias de la NOM (120 µg/m ³) en la zona urbana y 15 excedencias en la zona rural. Verano: 8 excedencias zona urbana y 7 excedencias zona rural.	Canales <i>et al.</i> , 2014
Colima, Colima		Una estación de monitoreo Periodo: Octubre 2006 – Enero 2007 y Marzo – Mayo 2007. Muestreadores alto volumen (Tisch Environmental)	Gravimétrico Determinaciones químicas de metales, contenido de carbono, inorgánicos	Aproximadamente un 50% de las muestras sobrepasó el límite de la OMS (50 µg/m ³). Las principales fuentes corresponden a resuspensión de polvos, actividad volcánica, industria, agricultura, y emisiones vehiculares.	Campos <i>et al.</i> , 2011
Guadalajara, Jalisco	PM ₁₀	Monitoreo automático 8 estaciones de monitoreo Periodo: 2000 – 2005	Gravimétrico	PM ₁₀ fueron el principal contaminante atmosférico y puede significar un riesgo a la salud de la población.	Ramírez <i>et al.</i> , 2009
Ciudad de México	TSP PM ₁₀	Periodo: 1996 – 1998	Gravimétrico	En los tres años analizados las tendencias mostraron que los niveles de	Múgica <i>et al.</i> , 2002

		5 estaciones de monitoreo No se indica técnica de muestreo Filtros fibra de cuarzo	Químico Microscopia (SEM)	TSP y PM ₁₀ no se redujeron.	
San Luis Potosí, San Luis Potosí	PM ₁₀ TSP	4 estaciones de muestreo Periodo: Mayo 2003 a Abril 2004 Muestro manual Staplex (TSP) Alto volumen (PM ₁₀)	Microscopia electrónica de barrido (SEM) EDS Modelación (MM5 y MMCM)	La media anual excede tanto la normatividad mexicana como la de la Organización mundial de la Salud. El análisis por SEM mostró partículas provenientes de industrias de manufactura de baterías, química, producción de ácido sulfúrico y quema de combustóleo.	Pineda <i>et al.</i> , 2014
Chiapas	PM ₁₀	3 estaciones de monitoreo de la red SAMARS (Reforma, Girdaldas, Artesa) Enero 2001 – Febrero 2005	Gravimétrico	Las estaciones Girdaldas y Reforma se encuentran ubicadas muy cerca por lo que se cree que se encuentran en una zona con una atmósfera homogénea, registrando valores de contaminantes muy similares.	Ramos <i>et al.</i> , 2010
Ciudad de México	PM ₁₀ y PM _{2.5}	Muestreadores secuenciales volumen medio 6 estaciones de monitoreo	Determinaciones gravimétricas	Reportaron excedencias a normas nacionales e internacionales. Los muestreos de 6 horas ayudaron a interpretar mejor la variabilidad temporal del material particulado que los de 24 horas.	Vega <i>et al.</i> , 2002
Ciudad de México	PM ₁₀ y PM _{2.5}	Muestreadores bajo volumen Filtros de teflón	Gravimetría Fluorescencia de rayos X	Los niveles más altos fueron encontrados en una zona industrial.	Vega <i>et al.</i> , 2004
Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey	PM ₁₀	Estaciones de monitoreo automático	Gravimétrico	En las tres ciudades las concentraciones de PM ₁₀ se fueron incrementando en la temporada de otoño y el nivel más alto se registró en invierno.	Benítez <i>et al.</i> , 2014.
Chihuahua, Chihuahua	PM ₁₀	7 sitios de monitoreo Equipos Hi-Vol Agosto 2004 – Septiembre 2005	SEM Gravimetría	Las concentraciones de PM ₁₀ presentan una elevada variación espacial.	Campos <i>et al.</i> , 2007
Tlaxcoapan, Hidalgo	PM ₁₀	Junio – Diciembre 2007 Bajo volumen Filtros nucleoporo	PIXE (Emisión de rayos X inducida por partículas) SEM	Reportaron la presencia de polvo mineral como principal fuente de PM ₁₀ .	Martínez <i>et al.</i> , 2010

Metales pesados en MP en ciudades mexicanas

La normatividad respecto a metales pesados en aire en México es escasa. La NOM-026-

SSA1-1993 establece que la media aritmética de un periodo de tres meses de Pb, como contaminante atmosférico, no debe rebasar 1.5 µg/m³, para protección de la salud de la población. En el caso del

estudio realizado en Hermosillo, Sonora (Cruz *et al.*, 2013) se utilizaron referencias como la OMS y de la Agencia Europea del Medio Ambiente y los niveles no fueron excedidos. Del mismo modo que la normatividad es poca, los estudios respecto a metales pesados en MP son muy limitados. En relación a los estudios mencionados en la sección anterior en algunos se realizó la extracción y análisis de metales pesados con la finalidad de conocer las posibles fuentes de emisión de los contaminantes.

En el Tabla 3 se sintetizan algunos trabajos en los que se han realizado determinaciones de metales pesados en México. Diversas investigaciones destacan la reducción de metales pesados principalmente el Pb, como son la Ciudad de México (Múgica *et al.*, 2002) y Hermosillo, Sonora (Cruz *et al.*, 2013). Esta disminución del plomo en México se atribuye a la mejora en la calidad de las gasolinas (Cruz *et al.*, 2013).

Tabla 3. Resumen de investigaciones sobre elementos metálicos en MP en ciudades mexicanas

Ciudad	Metodología de muestreo y tipo de filtro	Elementos metálicos	Técnica de Análisis de Metales	Referencia
Tijuana	Equipos de alto volumen Filtros de cuarzo		ICP-MS ICP-AES	Minguillón <i>et al.</i> , 2014
Hermosillo, Sonora		Pb, Cd, Ni, Cu, Cr	FAAS Perkin Elmer 3110	Cruz <i>et al.</i> , 2013
Puebla, Puebla	Filtros fibra de vidrio	As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V.	ICP-OES (Modelo: Varian 720 ES)	Morales <i>et al.</i> , 2014
Colima	Filtros fibra de cuarzo Equipos alto volumen	As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, V, Zn, entre otros	ICP-MS (X Series II, Thermo)	Campos <i>et al.</i> , 2011
Ciudad de México	Filtros fibra de cuarzo	Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Ti, Fe, V	ICP-MS (Thermo Jarrel ash)	Múgica <i>et al.</i> , 2002
Ciudad de México	Equipos de alto volumen Filtros de microfibra de cuarzo	Cd, Cr, Mn, Ni, Pb y V	GFAAS (absorción atómica acoplada a horno de grafito GCB 932AA de doble haz)	Báez <i>et al.</i> , 2007.
Ciudad de México	Equipos de bajo volumen minivol (Airmetrics) Filtros de teflón de 47 mm	Al, Si, Ca, Fe, Cu, Zn, Ba y Pb	Fluorescencia de rayos X	Vega <i>et al.</i> , 2004
Tlaxcoapan, Hidalgo	Equipos de bajo volumen	Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb	PIXE SEM	Martínez <i>et al.</i> , 2010
San Luis Potosí, San Luis Potosí,	Equipos de alto volumen	As, Cd, Cu, Pb, Ni, Fe y Cr	SEM Espectroscopia de energía dispersiva (EDS)	Aragón <i>et al.</i> , 2000

Discusión y Conclusión

En ciudades mexicanas las fuentes de contaminación natural fueron volcanes y material geológico por erosión del viento. De origen antropogénico las fuentes más comunes fueron el tráfico vehicular en calles pavimentadas y no pavimentadas, la quema de combustibles fósiles, basura y residuos agrícolas, una gran gama de procesos industriales y las plantas de generación eléctrica.

Los tiempos más largos de monitoreo fueron el D.F., Monterrey y Guadalajara con periodos de más de 3 años realizados por monitoreo automático. En el Cuadro 2 se puede observar que para monitoreo manual la técnica más utilizada fue alto volumen. Por otra parte, las muestras obtenidas de monitoreo automático fueron utilizadas para investigar comportamientos espacio-temporales y las de manual se emplearon para estudios de caracterización fisicoquímica. Los presupuestos dedicados para el monitoreo de la calidad del aire generalmente son muy bajos y el costo de mantenimiento de los equipos es alto, por esta razón se opta por la obtención de datos de un modo distinto al monitoreo automático.

Después de haber realizado la revisión de las investigaciones sobre MP y metales pesados en México fue evidente que aún falta mucho por hacer:

- Promover programas de verificación vehicular más estrictos y reforzar los de pavimentación. En casi todos los estudios se pudo observar que el tráfico vehicular

resuspende partículas tanto de calles pavimentadas como sin pavimentar.

- Promover programas de control de contaminación que eliminen los problemas desde diferentes perspectivas pues las fuentes de contaminación cambian por temporadas (clima) y a la variedad de industrias características en cada localidad.
- Realizar modelaciones de la distribución espacio-temporal de los contaminantes mediante modelos de dispersión y parámetros meteorológicos como el MM5. Únicamente una investigación realizada en San Luis Potosí abordó el tema de la modelación, siendo que es de gran importancia para poder determinar la relación existente entre la emisión de contaminantes, sus concentraciones y plantear escenarios a futuro.
- Fortalecer la generación de políticas públicas. Es evidente que existe falta de información sobre PM_{10} y $PM_{2.5}$ en casi todo el país, esto hace más difícil la generación de políticas públicas específicas para cada una de las ciudades. La insuficiencia de información y muestreo de MP es un gran obstáculo para cumplir otro gran reto: la caracterización química. Conocer la composición tanto física como química, las propiedades y comportamiento de las partículas es una parte fundamental para identificar fuentes de emisión de contaminantes y poder tomar medidas de control. Dentro de esta caracterización resulta importante incluir carbono

orgánico, carbono elemental, iones inorgánicos y elementos traza.

- Implementar sistemas de monitoreo e información sobre la calidad del aire en zonas con fuentes de contaminación naturales. En el caso particular de Puebla se resalta la importancia de implementar un sistema de monitoreo para evitar el enriquecimiento de la ciudad con contaminantes, ya que tiene una fuente natural de contaminación natural muy cercana, como es el volcán Popocatepetl. Esta necesidad también pudiera aplicar a Colima, por su proximidad al volcán de Colima.

Es de reconocerse que ha habido grandes avances y casos de éxito como fue la reducción de Pb de las gasolinas para la mejora de la calidad del aire en México. El nuevo reto respecto a MP es cumplir con las exigencias planteadas en la actualización que se realizó en el 2014 a la NOM-025-SSA1-1993. Mejorar y actualizar la determinación de MP para ir de la mano con las nuevas tendencias, como lo es el monitoreo de partículas finas (PM_{2.5}) es indiscutiblemente necesario, especialmente si se quiere lograr el objetivo de proteger la salud de la población y los ecosistemas mexicanos.

Referencias

Aragón Piña A., Torres Villaseñor G., Monroy Fernández M., Luszczewski Kudra A., Leyva Ramos R. (2000). Scanning electron microscope and statistical analysis of suspended heavy metal particles in San Luis Potosí, México. *Atmospheric Environment* 34, 4103 – 4112.

Báez P.A., García M.R., del C. Torres B.M., Padilla H.G., Belmont R.D., Amador O.M., Villalobos-Pietrini R. (2007). Origin of trace elements and inorganic ions in PM10 aerosols to the South of Mexico City. *Atmospheric Research* 85, 52-63.

Balti Eric V., Echouffo-Tcheugui Justin B., Yako Yandiswa Y., Kengne Andre P. (2014). Air pollution and risk of type 2 diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis. *Diabetes Research and Clinical Practice* 106, 161 – 172.

Benítez García Sandy Edith, Kanda Isao, Wakamatsu Shinji, Okazaki Yukiyo, Kawano Masahide. (2014). Analysis of Criteria Air Pollutant Trends in Three Mexican Metropolitan Areas. *Atmosphere* 5, 806 – 829.

Campos A., Alcaraz G.I., Herrera E.F., Sosa M., Jiménez J., Delgado M., Ramírez E., Puga S. (2007). Análisis temporal de las concentraciones, distribución de tamaño y morfología de partículas suspendidas menores a 10 micras en la ciudad de Chihuahua, México, *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 3 (1): 44-51.

Campos Ramos Arturo A., Aragón Pina Antonio, Alastuey Andrés, Galindro Estrada Ignacio, Querol Xavier. (2011). Levels, composition and source apportionment of rural background PM10 in western Mexico (state of Colima). *Atmospheric Pollution Research* 2, 409-417

Canales Rodríguez Miguel A., Quintero Núñez Margarito, Castro Romero Telma G., García Cuento Rafael O. (2014). Las Partículas Respirables PM10 y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali, Baja California en México. *Información Tecnológica* Vol.25 (6), 13-22

Cruz Campas Martín Eusebio, Gómez Álvarez Agustín, Quintero Núñez Margarito, Varela Salazar Jaime. (2013). Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en la Ciudad

de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29 (4) 269-283

Environmental Protection Agency. (2013). Particulate Matter (PM). Estados Unidos de América. <http://www.epa.gov/pm/> (Consulta: 15 Abril, 2015)

González Santiago Omar, Badillo Castañeda Christian T., Kahl Jonathan D.W., Ramírez Lara Evangelina, Balderas Rentería Isaías. (2011). Temporal Analysis of PM10 in Metropolitan Monterrey, México. *Air & Waste Manage. Assoc.* 61: 573-579.

Grantz D.A., Garner J.H.B., Johnson D.W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment international* 29, 213 - 239

Hong Yun-Chul, Hwang Seung-Sik, Kim Jin Hee, Lee Kyonung-Ho, Lee Hyun-Jung, Lee Kwan-Hee, Yu Seung-Do, Kim Dae-Seon. (2007). Metals in Particulate Pollutants Affect Peak Expiratory Flow of Schoolchildren. *Environmental Health Perspectives* 115 (3), 430-434.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2013). Contaminantes criterio. México. <http://www.inecc.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio> (Consulta: 6 de Enero, 2015).

International Agency for Research on Cancer (IARC). Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Comunicado de Prensa. (2013). Francia. http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf (Consulta: 7 de Octubre, 2014).

Kim Ki-Hyun, Kabir Ehsanul, Kabir Shamin. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International* 74, 136 – 143

Martínez Carrillo M.A., Solís C., Andrade E., Isaac Olivé K., Beltrán Hernández R.I., Medina Moreno S.A., Martínez Reséndiz G., Ramírez Reyes A., Lucho Constantino C.A., Del Razo L.M. (2010). Aerosol composition from Tlaxcoapan, Hidalgo in central México. *Revista mexicana de Física* 56, 62 – 66

Minguillón María Cruz, Campos Arturo Alberto, Cárdenas Beatriz, Blanco Salvador, Molina Luisa T., Querol Xavier. (2014). Mass concentration, composition and sources of fine and coarse particulate matter in Tijuana, Mexico during Cal-Mex campaign. *Atmospheric environment* 88, 320-329

Morales García S.S., Rodríguez Espinosa P.F., Jonathan M.P., Navarrete López M., Herrera García M.A., Muñoz Sevilla N.P. (2014). Characterization of As and trace metals embedded in PM10 particles in Puebla City, México. *Environ Monit Assess* 186:55-67.

Múgica Violeta, Maubert Marisela, Torres Miguel, Muñoz José, Rico Enrique. (2002). Temporal and spatial variations of metal content in TSP and PM10 in Mexico City during 1996-1998. *Aerosol Science* 33, 91 – 102.

Organización Mundial de la Salud. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización Mundial 2005. Resumen de evaluación de los riesgos. 2006. Suiza. http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf (Consultado: 23 de Febrero, 2015).

Pineda Martínez Luis F., Carbajal Noel, Campos Ramos Arturo, Aragón Piña Antonio, García Agustín R. (2014). Dispersion of atmospheric coarse particulate matter in the San Luis Potosí, México, urban area. *Atmósfera* 27 (1), 5 – 19.

Ramírez Sánchez Hermes U., Andrade García María D., Bejaran Rubén, García Guadalupe Mario E., Wallo Vázquez Antonio, Pompa Toledano Ana C., de la Torre Villaseñor Odila. (2009). The spatial-temporal distribution of the atmospheric polluting agents during the period 2000 – 2005 in the Urban Area of Guadalajara, Jalisco, México. *Journal of Hazardous Materials* 165, 1128 – 1141.

Ramos Herrera S., Bautista Margulis R., Valdez Manzanilla A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de

Chiapas, México. Universidad y Ciencia Trópico Húmedo 26 (1), 65 – 80.

Vega E., Reyes E., Sánchez G., Ortiz E., Ruiz M., Chow J., Watson J., Edgerton S. (2002). Basic Statistics of PM2.5 and PM10 in the atmosphere of Mexico City. *The Science of the Total Environment* 287, 167 – 176.

Vega Elizabeth, Reyes Elizabeth, Ruiz Hugo, García Jose, Sánchez Gabriela, Martínez Villa Gerardo, González Uriel, Chow C. Judith, Watson

G. John. (2004). Analysis of PM2.5 and PM10 in the Atmosphere of Mexico City during 2000-2002. *Journal of the Air and Waste Management Association* 54:7, 786 – 798

World Health Organization, Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide, Report on a WHO Working Group. (2003). Alemania. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf (Consulta: 13 de Marzo, 2015).