Estimación de Factores de Emisión de PM_{10} y $PM_{2.5}$, en Vías Urbanas en Mexicali, Baja California, México

Lourdes M. Meza*, Margarito Quintero, Rafael García y Jorge Ramírez

Instituto de ingeniería UABC, Blvd. Benito Juárez y calle de la normal s/ n Col. Insurgente Este, (21280) Mexicali, B.C.-México (e-mail: lmezatrejo64@gmail.com; maquinu@gmail.com)

*autor a quien debe ser dirigida la correspondencia.

Recibido Jul. 06, 2009; Aceptado Ago. 11, 2009; Versión Final recibida Nov. 13, 2009

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es estimar los factores de emisión (FE) que permitan valorar la cantidad de material particulado de las vías pavimentadas y no pavimentadas de la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Se empleó el modelo AP-42 de la US EPA, bajo un diseño estadístico al azar, correspondiente a 60 sitios de muestreo en un mapa georeferenciado con proyección UTM 11 Norte. Se obtuvieron los valores de carga y porcentaje de sedimento menor a $75\ \mu m$ en laboratorio, velocidad y número de vehículos, en campo. La estimación de los FE corresponden a 0.92 Kg. PM_{10}/VKT y 0.73 Kg. $PM_{2.5}/VKT$ en vías pavimentadas y 2.33 Kg. PM_{10}/VKT y 0.58 Kg. $PM_{2.5}/VKT$ en vías no pavimentadas, respectivamente. El valor de FE propio determina la cantidad de material particulado a suspenderse y la relación de los factores de emisión (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en ambas vías indica que es necesario hacer mantenimiento y control de flujo de vehículos.

Palabras clave: factor de emisión, vía urbana, sedimento en vía, material particulado

Estimation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ Emission Factors, in City Roadways of Mexicali, Baja California, Mexico

ABSTRACT

The objective of this research was to estimate the emission factors (EF) for evaluating the amount of particulate matter from paved and unpaved roads in the city of Mexicali, Baja California, Mexico. The model used was AP-42 of the U.S. EPA, under a random statistical design, corresponding to 60 sampling sites in a georeferenced map UTM 11 North projection. Load values were obtained and percent of sediment less than $75\ \mu m$ in the laboratory, speed and number of vehicles in the field. The estimated FE correspond to 0.92 kg PM_{10}/VKT and 0.73 kg $PM_{2.5}/VKT$ on paved road and 2.33 kg PM_{10}/VKT and 0.58 kg $PM_{2.5}/VKT$ on unpaved roads, respectively. The value of FE determines the amount of particulate matter to be suspended and the relation of the emission factors (PM_{10} and $PM_{2.5}$) in both roadways indicate that maintenance and control of vehicle flux may be needed.

Keywords: emission factor, urban roads, road sediment, particulate matter

INTRODUCCIÓN

Los materiales particulados (polvo, MP), identificados como PST (partículas suspendidas totales), PM₁₀ (material particulado con un diámetro menor a 10 micrómetro, μm) y PM_{2.5} (material particulado con un diámetro menor a 2.5 micrómetro, μm) son parte de los indicadores criterios para medir la calidad del aire limpio en un área determinada (OMS, 2006). Estas partículas tienen un impacto en la salud, ya que presentan características toxicológicas, lo cual depende de su origen y composición química como es el caso en algunas ciudades del norte de México, con gran crecimiento urbano, actividad industrial y localización geográfica (Flores et al., 2005; Osornio et al., 2007).

En el caso del polvo emitido en grandes cantidades, su fuente principal es la erosión del viento y las actividades agrícolas, las cuales son transportadas en escala global y regional. Goosens y Buck (2009), indican “que la gran cantidad de polvo emitido desde África hacia el Este (Océano Atlántico, el Caribe y América del Sur); Norte y Noreste (Europa), así como el proveniente de China, Mongolia y Pakistán es transportado al Este de Asia (Korea, Japón y Oeste del Pacífico)”. De la misma manera estos autores hacen hincapié en que hay otros aspectos poco estudiados como la acción mecánica de los vehículos en las vialidades pavimentadas y no pavimentadas, que puede contribuir al deterioro de la calidad del aire, ya que son receptoras y emisoras respectivamente del tipo de MP (PM₁₀ y PM_{2.5}) que se emiten a la atmósfera.

La ciudad de Mexicali, Baja California se caracteriza porque el MP es el principal problema de contaminación atmosférica de la ciudad y cuyo origen geológico (en relación a la textura del suelo) forma parte del desierto de Sonora, en segundo lugar esta el carbón orgánico producto de las quemas incompletas de residuos agrícolas (Quintero y Moncada, 2008), de la quema de carbón en taquerías, pollerías, etcétera, sales minerales y constituyentes secundarios (Chow et al., 2000).

El número de veces que se ha rebasado el límite máximo permitido de PM₁₀ (120 $\mu\text{m}/\text{m}^3$) acorde con la NOM-025-SSA (2005) en la ciudad de Mexicali B.C., han sido reportadas arriba de 20 días, desde 1997 que fue el inicio de la medición formal de las estaciones de monitoreo en la ciudad. Estas violaciones aumentaron por arriba de 40 días, en el período 2000 al 2006. La información fue obtenida de una base de datos, denominada Sistema de Calidad del Aire (AQS, por sus siglas en inglés), de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). Zuk et al., 2007, que reportan 43 días de violación en el 2005 y señala que a la fecha, Mexicali ocupa el primer lugar de las ciudades del Norte en relación con los contaminantes críticos, como son las PM₁₀.

Una manera de llevar a cabo la medición del MP es mediante la estimación del FE, que resulta de la medición de la cantidad de MP generado, debido al incremento de una cierta actividad y en el caso de polvo del camino, se expresa como la masa de partículas en un área como resultado de una unidad de viaje de un vehículo g/km (gramos de polvo por kilómetro recorrido), que se abrevia en inglés como VKT (US EPA, AP-42, 2006, Etyemezian et al., 2003).

Una definición clásica es la de Nicholson en 1989, “como producto del rodamiento de las llantas de los vehículos que imparten una fuerza a la superficie que pulverizan el material del lecho del camino no pavimentado y las partículas son expulsadas por una fuerza cortante, la cual provoca una estela turbulenta de los vehículos” y que ha sido parte de un modelo de evaluación en algunas regiones de Norteamérica, al medirse en tiempo real las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} (Guillies et al., 2005).

Actualmente el MP se ve como una mezcla compleja (emisión local de los vehículos) por la contribución de las emisiones de los tubos de escape, desgaste de frenos y llantas de los vehículos de transporte (Ketzela et al., 2007, Abu-Allaban et al., 2003), los cuales indican que las emisiones provenientes de tubos de escape y polvo son mecanismos dominantes que contribuyen significativamente al factor de emisión de MP.

A partir de un modelo de regresión multilag (Abu Allaban, et al., 2003) se encontró que la contribución de polvo resuspendido es función de la velocidad del vehículo (v), condiciones de la vialidad (carga del sedimento, C_s) y el porcentaje de vehículos pesados (P).

Las partículas suspendidas totales (PST), son parte de los polvos de las vías urbanas en varias ciudades de países europeos (Alemania, Austria, Dinamarca, Finlandia y Suecia) por el empleo de antideslizantes (arena/sal) que generan partículas minerales (se asocia el 90% de MP a silicatos de aluminio), como una fuente de material particulado y causa de serios problemas ambientales (Tervahattu et al., 2006, Ketzela et al., 2007, Gustafsson et al., 2009). Esto ocurre especialmente en el período de invierno a primavera, en donde se reportan para las ciudades escandinavas, 35 excedencias anuales, cuyo límite máximo diario para PM₁₀ es de 50 µg/m³ (OMS, 2006).

En Taiwán, República de China, acorde con estudios previos el PM₁₀ tiende a ser un indicador estándar de contaminación y el cual se ha excedido 100 veces desde 1944 hasta la fecha, lo que ha llevado a realizar una serie de estudios para identificar las variables que afectan los FE, tal como fue el proyecto de túnel de viento, donde se consideran la velocidad del viento (V), carga de sedimento (Cs), contenido de humedad de polvo del camino (M), número y velocidad de vehículos (v), como elementos importantes de estimación que en otros modelos no son considerados (Tsai y Chang 2002). Una observación a este experimento es que se compara con modelos de vías no pavimentadas y pavimentadas, empleados actualmente en US EPA, AP-42, (2006) sin hacer una diferenciación entre ambas condiciones.

En el caso de los modelos europeos y americanos, los parámetros independientes son los mismos, es decir carga y porcentaje del sedimento, velocidad, peso y tipo de vehículo, así como las condiciones meteorológicas del lugar (velocidad del viento, dirección y temperatura); la manera de medirlos es lo que los hace diferente y característico del lugar. Plantear valores de FE de otros sitios no es comparativo, porque los valores no rebasan 1 kg/VKT o en algunas regiones desérticas el valor es por arriba de 10 kg/VKT.

Estudios recientes revisan otros aspectos del suelo, como es la composición elemental en una vía no pavimentada en Nuevo México, en donde el tipo de textura (arena, limo y arcilla) afecta la distribución y el tamaño de la partícula a emitirse, pues entre más alta sea la velocidad del automóvil, mayor será la altura de la estela, por lo tanto, la amplitud y dispersión de material particulado fino (William et al. 2008) será mayor. En el mismo tenor, Goosens y Buck (2009) lo relaciona más con la textura del suelo tipo fina (arcilla) lo que hace que la emisión sea mayor, independientemente de las otras variables empleadas.

Una forma de estimar el FE, ha sido el método US EPA AP-42 (2006), que se conoce como modelo mecánico, aunque existen otros dos: los adaptativos y los de múltiples variables (SEMARNAT, 2001). El primero ya ha sido empleado en algunas ciudades de México (Flores et al., 2005, Ramírez, 2004) y se obtiene un FE que permite valorar la cantidad de MP a suspenderse en las vías urbanas de la ciudad de Mexicali y la distribución espacial del mismo. Los objetivos fueron la obtención de un tamaño de muestra (n) y la selección de sitios con base en un diseño de bloques al azar apoyado con una herramienta de trabajo, correspondiente a un mapa georeferenciado con proyección UTM (por sus siglas en inglés, Universal Transversal Mercator) zona 11 Norte. Un resultado importante fue obtener una relación de FE PM₁₀ y PM_{2.5} en vías pavimentadas relativamente igual y altas concentraciones de FE de PM₁₀ en vías pavimentadas en menor porcentaje (FE de PM_{2.5}). Lo cual estaría apoyando a la teoría de que en presencia de material fino, mayor es la cantidad del material particulado producto de la acción mecánica de los vehículos automotores en ambas vías.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Mexicali se localiza en el noroeste de la República Mexicana (32°40'N, 115°27'W), en el estado de Baja California, (Figura 1) y limita al norte con el estado de California. En cuanto a su clima, se presentan grandes contrastes climáticos, ya que en el verano se tienen temperaturas máximas cercanas a los 50°C, mientras que en el invierno las temperaturas mínimas ocurren alrededor de los 0°C. La temperatura promedio durante el año es de 25 °C. Hay escasez de precipitación pluvial, siendo el promedio anual de lluvia de 75 mm. Asimismo, durante el verano hay una predominancia de los vientos del sureste y del noroeste en el invierno (García et al., 2007).

Fig. 1: Ubicación del área de estudio. a) Puntos de muestreo identificados con el símbolo de “+” en su correspondiente AGEB en vías de la Ciudad de Mexicali b) Localización geográfica de Baja California, México.

Diseño del tamaño de la muestra (n) y selección de sitios.

Se diseñó un mapa georeferenciado (herramienta de trabajo) en Autocad 2007 proyección UTM 11 zona Norte y Mapinfo 2008, en donde se localizaron los sitios de muestreo. El diseño de la herramienta de trabajo, se apoyó en la información digitalizada de instituciones gubernamentales así como de organismos desconcentrados, tales como IMIP (Instituto Municipal de Planeación) e INEGI (Instituto Nacional Estadística, Geografía e Informática). Posteriormente, se procedió al diseño del tamaño de la muestra (n) y selección de los sitios, con el apoyo del método del Área Geoestadística Básica (AGEB) que correspondió a 266 AGEB, donde se encontró un valor de proporcionalidad (P) de 0.2, producto de la relación de vías pavimentadas y no pavimentadas, que indica que por cada cuatro vías pavimentadas existe una sin pavimentar, dentro de cada uno de los AGEB. En el diseño del tamaño de la muestra se empleó una ecuación de muestras finitas sin reemplazo (Flores et al., 2005).

Se obtuvo un número de 30 (n) como resultado del tamaño de muestra en base a una dimensión poblacional de 266 AGEB apoyado con antecedentes de estudios realizados en lo referente a material particulado suspendido (SEMARNAP, 1999; Osornio et al., 2007 y Mendoza et al., 2007) y premuestreo en el mapa base. Se encontraron 99 AGEB (N) con 639 vías, con un error esperado (e=0.1), un nivel de confiabilidad ($Z_{\alpha/2}$) al 5% y se procedió aplicar la ecuación 1.

$$n = \frac{N Z_{\alpha/2}^2 P(1-P)}{(N-1)e^2 + Z_{\alpha/2}^2 P(1-P)} \tag{1}$$

Los sitios seleccionados para el muestreo fueron tomados de acuerdo a lo recomendado en el apéndice C.1, AP-42 Vol. 1 (US EPA, AP-42, 1993), que al considerar la longitud de las vías pavimentadas y no pavimentadas, y el número de muestras (1 a 3) el área de recolección de sedimento fue diferente, pero se mantuvo en el rango de 30 cm² para vías pavimentadas y de 30 a 300 cm² para vías no pavimentadas. La avenida más larga e intersección de una calle principal, se toma como punto de inicio para recolectar la muestra, siendo muestreadas las avenidas secundarias y colectoras tales como aquellas en zonas habitacionales, escuelas, comercios. No se muestrearon las avenidas primarias, como fueron la Lázaro Cárdenas, López Mateos y Benito Juárez, pero para la colección de las muestras se tomaron los entronques de las mismas.

Trabajo de campo

Se inició el muestreo en febrero, el cual se llevó a cabo dos veces por semanas se finalizó en mayo del 2008, en la temporada invierno-primavera, dicho muestreo fue basado en la herramienta de trabajo y un sistema de posicionamiento geográfico (GPS, por sus siglas en inglés), para la identificación del sitio de recolección del sedimento. En los puntos de muestreos indicados en la Figura 2 (a) que corresponden a las áreas noreste y noroeste se observa un mayor número de vías pavimentadas y se tuvo un grado de dificultad alto para su recolección, en virtud del tránsito vehicular local. De igual manera en las áreas periféricas como son noroeste, suroeste y sureste, se identificaron un mayor número de vías no pavimentadas (Figura 2 (b)).

Fig. 2: Localización de los sitios monitoreados identificados con el símbolo de “+” dentro de su AGEB correspondiente (a) áreas pavimentadas y (b) áreas no pavimentadas

Se colectaron de 1 a 3 muestras de acuerdo con un tramo de vialidad (0.3 a 1.7 km) en un AGEB seleccionado, empleando escobas y colectores de polvo correspondientes a las vías no pavimentadas; en el caso de vías pavimentadas se empleo la aspiradora, cuyo tamaño de bolsa fue de 2 a 3 kg. Las muestras se analizaron via seca con tamizado mecánico y los tamices utilizados estuvieron en el rango del No. 20 al 200 (Apéndice C.2 de US EPA, AP-42, 1993).

El muestreo se llevó a cabo de las 7:00 a 14:00 hrs de lunes a viernes, en los días de mayor afluencia vehicular, según un estudio realizado por Hernández et al., (2000) y que se tomó como base para la interpolación de datos encontrados en campo de 3,560 y 894 autos promedio/día natural para vías pavimentados y no pavimentados respectivamente, producto del aforo que se llevó a cabo en los puntos de recolección de la muestra.

Se estimó la velocidad media (km/hr) de los vehículos que transitaban en el tramo de la vialidad que se aforó y muestreo, donde se registraron velocidades de 23.4 y 30 km/hr, para los tramos no pavimentados y pavimentados, respectivamente. Esto tiene relación con las vías secundarias y terciarias a las cuales se asocian velocidades medias de 30 y 50 km/hr así como de 20 y 30 km/hr, con los tramos de 1.5 km y 0.8 km, respectivamente (SAHOPE, 2001).

Para el peso promedio de vehículo en la vía aforada, se retomó la propuesta de análisis que se realizó en la ciudad de México, para la estimación del factor de emisión y empleo del modelo US EPA, AP-42 (2006) en donde se considera la contribución de peso del número de ejes por vehículos (Ramírez, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fueron necesarios dos parámetros (en gabinete y laboratorio) para determinar el peso vehicular: a) se conoce que en México se carece de información necesaria para definir las características de los vehículos y sus tendencias, por lo que se reporta un valor de peso vacío de 2,500 y 5,000 Kg., en relación al número de ejes que poseen (SAHOPE, 2001); b) y conforme al número de vehículos por día natural, que fueron base para estimar las contribuciones de pesos vehiculares, y para esto le corresponden 3,045 Kg. para las vías no pavimentadas y 2,718 Kg. a las vías pavimentadas, como resultado de la metodología aplicada por Hernández et al. (2000).

De manera similar se llevó a cabo la estimación de carga para las vías pavimentadas con un rango de 2 a 21 g/m² para 3,560 autos promedio/día y una velocidad promedio de 30 km/hr, que son valores diferentes a lo citados en tablas como son 0.4 a 3 g/m², correspondiente a un número menor a 5,000 vehículos/día (Ramírez, 2004), lo que confirma la importancia de su determinación en la región. Para el porcentaje de sedimento en las vías no pavimentadas resultó en un intervalo de 1.84-8.93%, para 894 autos promedio/día, con una velocidad de 23.4 km/hr, donde US EPA, AP-42 recomienda del 4 a 7 % de contenido de sedimento para pesos de vehículos de 1,176 Kg. (Guillies et al., 2005).

Con base en la obtención de los valores medios de las variables independientes requeridos, se estima el FE, que corresponde a Megagramos por kilómetro recorrido por el vehículo en un tiempo determinado (Mg/VKT), en las vías pavimentadas y no pavimentadas, como se indica en las ecuaciones 2 y 3 del modelo US EPA, AP-42 (2006), las cuales fueron usadas por Flores et al. (2005) y Ramírez (2004) en Chihuahua, Chih. y México, D.F., respectivamente y se observan variables distintas para cada tipo de vialidad.

En el caso de vías pavimentadas, las variables independientes requeridas para estimar el FE, le corresponde a la constante del multiplicador del tamaño de partícula (k) para PM₁₀ y PM_{2.5} un valor de 4.6 y 2.1 g/VKT, respectivamente; Cs, se refiere al contenido de sedimentos del material de la superficie del camino (g/m²) y P, peso promedio del vehículo (Mg).

$$FE = k \left(\frac{Cs}{2} \right)^{0.65} \left(\frac{P}{3} \right)^{1.5} \tag{2}$$

En las vías no pavimentadas, existe una diferencia en la manera de conocer el contenido de sedimento en la superficie del camino, el cual es medido a través del porcentaje de material (s) que queda retenido en una malla No. 200. Aquí el valor de la constante k, es adimensional, que corresponde a un valor de 0.36 y 0.095 para PM₁₀ y PM_{2.5}. y las variables independientes nuevas son velocidad promedio del vehículo (v, km /hr), número promedio de ruedas (r) y número de días con una precipitación $\geq$ a 0.25 mm (p), por las características de la región y los días de monitoreo, le correspondieron un promedio de dos.

$$FE = k(1.7) \left(\frac{s}{12} \right) \left(\frac{v}{48} \right) \left(\frac{P}{2.7} \right)^{0.7} \left(\frac{r}{4} \right)^{0.5} \left(\frac{365-p}{365} \right) \tag{3}$$

Las velocidades medias del viento fueron de 1.82 y 2.2 m/s para los días de muestreos en las vías pavimentadas y no pavimentadas respectivamente, con un número de calmas alrededor del 13%. La dirección del viento predominante correspondió más a la zona Noreste.

En la Tabla 1, se presentan los resultados totales promedios de los FE, de ambos tipos de vías (pavimentadas y no pavimentadas), los cuales son parte del método US EPA, AP-42 (2006). A diferencia de la ciudad de Chihuahua, Chih. (Flores et al., 2005), se determinaron dos variables, la velocidad media y contribución de peso.

Tabla 1: Resultados de factores de emisión acorde al modelo US EPA, AP-42

FE, kg/VKT	Tipo de vía	Valor	Desviación estándar	Error
PM ₁₀	No Pavimentada	2.33	1.20	0.22
PM _{2.5}	No Pavimentada	0.58	0.30	0.05
PM ₁₀	Pavimentada	0.92	0.22	0.04
PM _{2.5}	Pavimentada	0.73	0.31	0.06

En las Figuras 3 y 4 se observan comportamientos de contribución de FE de PM₁₀ y PM_{2.5} análogos a comportamiento en los dos tipos de vías, excepto que la relación porcentual entre ellos es diferente. Es más alto el contenido de PM₁₀ en las vías no pavimentadas que en la de pavimentadas. La predominancia de PM₁₀ es alta en las vías pavimentadas y en menor cantidad las PM_{2.5}.

Fig. 3: FE, zona pavimentada.

Fig.4: FE, zona no pavimentada.

Al comparar los resultados de la Tabla 2, con algunos realizados en Nevada, EEUU, por Abu-Allaban et al. en 2003, los de éste último fueron parecidos a los encontrados en Mexicali, B.C., para el caso de FE de PM₁₀ en vías pavimentadas; por otro lado diferente a lo encontrado por Flores et al. (2005) en Chihuahua, Chih., y mucho menor a lo de Ramírez (2004), en D.F. México. Este último se entiende por su localización geográfica y limpieza de las vías urbanas.

En lo relacionado con el FE de PM₁₀ en vías no pavimentadas no hay comparación con Nevada y las otras dos ciudades de México, problema que ha caracterizado a la ciudad de Mexicali con un gran contenido de material particulado y por consecuencia los valores de PM_{2.5} son altos. William et al. (2008) mencionan una gran predominancia de PM_{2.5} en relación con altas velocidades de los vehículos y eso sería una explicación a lo mostrado en la Figura 3.

Tabla 2: Comparación de mediciones de FE, g/VKT.

Parámetros	FE,	FE	FE	FE
	(D.F., México)	(Chih., Chih.)	(Nevada, EEUU)	(Mexicali, B.C)
PM ₁₀ (pav.)	0.429	378	90-840	923
PM _{2.5} (pav.)	0.103	1, 730	6-87	734
PM ₁₀ (no pav.)	207.8	182		2, 330
PM _{2.5} (no pav.)	30.4	48		580

Otra manera de observar el comportamiento de los valores de los FE es a través de un análisis espacial, apoyado con la herramienta de trabajo diseñada, en el que se retoman los datos de los sitios de muestreo en las coordenadas UTM (x, y) en metros (m). La coordenada (z) representa el FE medio estimado, acorde al tamaño de la partícula (PM₁₀ y PM_{2.5}) y tipo de vialidades.

Posteriormente se organizó esta información en una tabla de tres columnas en formato Excel 2007 y apoyado con la herramienta surfer 6, se utilizó la opción del método de interpolación Kriging, el cual se basa en el promedio de las ponderaciones para el cálculo de las estimaciones. Se obtuvieron las cuatros gráficas (Figura 5 a la 8), que son superpuestas en un mapa de la Ciudad de Mexicali, B.C.

En la Figura 5 se muestra la predominancia de valores de 2 a 2.6 kg/VKT para FE PM₁₀, en la zona noroeste y un pico arriba de 4 kg/VKT al sur y suroeste, respectivamente., En la zona Sureste se observan valores mayor a 3 kg/VKT, mismo que se repite en un punto de la parte Noreste (correspondiente a la parte periférica de la ciudad) y que se caracterizan por la afluencia de vehículos ligeros y pesado.

Fig. 5: Isolineas de valores de FE para PM₁₀ (vías no pavimentadas).

Los valores de FE, en la Figura 6, fueron de 0.6 a 0.95 kg/VKT en la zona Sur y Sureste, áreas que coinciden con los valores de FE de PM₁₀ altos y de igual manera en la zona Noroeste y Noreste, que

corresponde al área periférica, que da un FE por arriba de 0.7 kg/VKT, característica del movimiento de tráfico pesado. Esto se relaciona con los resultados experimentales que encontraron Williams et al (2008) en Nuevo México y Goossens y Buck (2009), que dependiendo de la textura del suelo será la cantidad de material particulado.

Fig. 6: Isolineas de valores de FE para PM₅ (vías no pavimentadas).

En relación con las vías pavimentadas (Figura 7), se tienen los FE de PM₁₀, de 0.7 a 1.2 kg/VKT, en las áreas periféricas muestran los valores mas altos de las cuatro zonas estudiadas, a excepción de que en la parte centro se encuentra un pico de 1 kg/VKT, lo cual se le atribuye a la erosión del viento por su ubicación geográfica, Se tiene el antecedente que existe un trasporte transfronterizo de PM₁₀ a través de la frontera que es influenciado por la dirección del viento y la cantidad de MP generado en cada lado de la frontera (Quintero y Sweedler, 2005).

Fig. 7: Isolineas de valores de FE para PM₁₀ (vías pavimentadas)

De igual manera en la Figura 8, los resultados de los FE de $PM_{2.5}$, se le atribuyen al movimiento de tráfico pesado, con valores de 0.47 a 1 kg/VKT en la zona del Noreste y de 1 a 1.2 kg/VKT en la zona Norte y Noroeste respectivamente, y en donde ambos puntos están cerca de la línea internacional. Abu-Allaban et al. (2003) asignaban los valores altos de $FE_{2.5}$ a los vehículos de diésel, identificados como pesados o a un número grande de vehículos en una vialidad. En el área Noroeste se reportan valores en el rango de 0.9 a 1.2 y un pico alto de 1.6 kg/VKT al Suroeste, la cual comunica con el libramiento Mexicali-Tijuana, y cuenta con movimiento de tráfico pesado.

Fig. 8: Isolineas de valores de FE para PM_{2.5} (vías pavimentadas)

CONCLUSIONES

El análisis presentado muestra que a pesar de que la erosión de viento es una fuente significativa de polvo en las vías urbanas de la Ciudad de Mexicali, la acción mecánica de los vehículos contribuye a ser una emisión importante, por sus valores altos de FE de PM_{10} en vías no pavimentadas. En las vías pavimentadas los valores de FE para PM_{10} guardan una relación cercana a los FE para $PM_{2.5}$. El mantenimiento de limpieza periódica en las avenidas, contrarrestan la acumulación de material particulado fino.

Los valores de los FE estimados difieren a los obtenidos en las dos ciudades de México (Chihuahua y D.F.), y cercana a la del Estado de Nevada, EEUU, por lo que para cálculos futuros es importante considerar el tipo de textura de suelo de la región (arena, arcilla y limo), limpieza de avenidas, control de vialidades, entre otras, tal y como se evidenció durante el trabajo en las zonas con mayores posibilidades de contaminación, estudio que puede ser apoyado con el diseño de un mapa georreferenciado y un tamaño de muestras acorde a las características de la región.

REFERENCIAS

Abu-Allaban, A. John, Gilles y Alan W.Gertler; Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on road vehicles, *Atmospheric environment*: 37. 5283-5293 (2003).

AQS-EPA, Technology transfer network (TTN), <https://oasat.epa.gov/aqs>. Acceso 31 de Agosto (2009)

- Chow J., J. Watson, M. Green y D. Lowenthal; Cross-Border Transport and Spatial Variability of Suspended Particles in Mexicali and California's Imperial Valley, *Atmospheric Environment*: 34(11), 1833-1843. (2000)
- Etyemezian, V. y otros seis autores; Vehicle based road dust emissions measurement (III): effect of speed, traffic volume, location, and season on PM₁₀ road dust emissions; *Atmospheric Environment*: 37, 4583-4593. (2003)
- Flores, J.C. y otros cinco autores; Estimation of emission factors of load silts in roads of Chihuahua, Mexico and its radiological characteristics, *Acta Universitatis Debreceniensis*: Vol. 153, 153-164. (2005)
- Garcia C., O. Jáureguio, D. Toudert y M. Tejeda; Detection of the urban heat island in Mexicali B.C., Mexico and its relationship with land use *Atmosphere*: 2002(2), 111-131. (2007).
- Goossens D. y B. Buck; Dust emission by off road driving: Experiments on 17 arid soil types, Nevada, USA, *Geomorphology*: 107 (4), 118-138. (2009).
- Guillies, J.A. y cuatro autores; Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions, *Atmospheric Environment*: 39, 2341-2347. (2005)
- Gustafsson M. y otros cinco autores; Factors influencing PM₁₀ emissions from road pavement wear, *Atmospheric Environment*: 43(31), 4699-4702. (2009)
- Hernández D. D., D. M. Galindo y Z.J.L. Benítez; Atlas de tránsito vehicular de la ciudad de Mexicali, Proyecto interno del Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali, B.C. (2000)
- Ketzel M. y otros diez autores; Estimation and validation of PM_{2.5}/PM₁₀ exhaust and non-exhaust emission factors for practical street pollution modeling, *Atmospheric Environment*: 41, 9370-9385. (2007)
- Mendoza A, E. Ch. Kolb, y G. A. Russell; Mexicali-Imperial Valley Air Quality Modeling and Monitoring Program. Final Report LASPAU January 2007. Tecnológico de Monterrey, Georgia Institute of Technology, Aerodyne Research Inc., Massachusetts Institute of Technology and Montana State University (2007)
- NOM-025-SSA Salud ambiental; Criterios para evaluar el valor la calidad del aire ambiente con respecto a material particulado. Valor de concentración máxima de material particulado para partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM₁₀ y partículas menores de 2.5 micrómetros PM_{2.5} en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. México D.F (2005).
- OMS (Organización Mundial de la Salud); Guías de Calidad del aire de la OMS, relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. OMS, pp. 7-12. Ginebra, Suiza. (2006).
- Osornio, A. y otros trece autores; Toxicological Evaluation of PM_{2.5} and PM₁₀ in the City of Mexicali and its Correlations with Soil Content: A Study to Evaluate and Direct Control Measures, Final Report LASPAU 2005-2007. INE, UNAM, INC, UABC: pp. 2- 3, 7-10. México D.F. (2007)
- Quintero N. M. y Moncada A.A.; Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California y Mexicali, Baja California, *Región y Sociedad*: Vol. XXI, No. 43, 3-24. (2008)
- Quintero N. M. y A. Sweedler; "La evaluación de la calidad del aire de los Valles de Imperial y Mexicali como un elemento para un programa comunitario". En *Desarrollo y Medio ambiente de la región fronteriza México – Estados Unidos, Valle de Imperial y Mexicali*, UABC, Editorial Porrúa, pp. 323-340, México, D.F. (2005)

Ramírez G. J.; "Inventario de Emisiones de PM10, PM2.5 y amoniaco de la ZMCM" En Estudio Integral de partículas atmosféricas en la Ciudad de México, editores Rangel E. y Villa G, pp. 237-270, del Instituto Mexicano del Petróleo Gerencia de Comunicación Social y relaciones públicas, México D.F: (2004)

SAHOPE, Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas del Estado de Baja California; Norma Técnica de Proyecto de Construcción para Obras de Vialidad del Estado de Baja California. Periódico oficial del Estado, 19 de octubre (2001).

SEMARNAT, CEC, CCA Y CCE.; Guía para la correcta selección y empleo de métodos de estimación de emisiones de contaminantes. pp. 143-168, México, D.F. (2001)

SEMARNAT, SSA, Gobierno del Estado y Municipal de B.C.; Programa para mejorar la calidad del aire de Mexicali 2000-2005. México, D.F. (1999)

US EPA, AP-42, Volume I, fifth edition, appendix C.1, procedures for sampling surface/bulk dust loading (1993), <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>. Acceso: 31 de agosto (2009)

US EPA, AP-42, Volume I, fifth edition, appendix C.2, procedures for laboratory analysis of surface/bulk dust loading samples (1993), <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>. Acceso: 31 de agosto (2009)

US EPA, AP-42, Fifth edition, volume I, chapter 13, miscellaneous sources (2006). <http://www.epa.gov/ttn/chie1/ap42/ch13/index.html>. Acceso: 31 de agosto (2009).

Tsai Chuen-Jinn y Chang Chung-Tso; An investigation of dust emissions from unpaved surfaces in Taiwan, Separation and Purification Technology: 29, 181-188. (2002)

Tervahattu H. y otros cuatro autores; Generation of urban road dust from anti-skid and asphalt concrete aggregates, Journal of Hazardous Materials: 132, 39-46. (2006)

Williams, D.S., M.K Shukla y J. Ross; Particulate matter emission by a vehicle running on unpaved road, Atmospheric Environment: 42 (16), 3899-3905. (2008)

Zuk M., G. Tzintzun y L. Rojas; Tercer almanaque de datos y tendencia de la calidad del aire en 9 ciudades Mexicanas. SEMARNAT e INE., pp. 116, México D.F. (2007).