

# **C**ontaminación atmosférica por incendios forestales en Morelia, Michoacán

*Armando Correa García*

## **Resumen**

En este estudio se reporta el incremento de partículas suspendidas  $PM_{2.5}$  por varios días en Morelia Michoacán, México. Este episodio sin precedentes aconteció por el efecto combinado de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, móviles y de área, en condiciones adversas del estado del tiempo. La relación hallada entre  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , y la velocidad del viento, podría confirmar el deterioro de la calidad del aire por incendios forestales y quemas agrícolas ocurridas en la primavera del 2019.

Por otra parte la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2014, que establece el valor límite de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio de 24 horas para  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , son criterios muy amplios, en términos de unidad de tiempo, porque se registraron de 1 a varias horas, concentraciones de  $PM_{2.5}$  hasta 3 veces mayores que los valores permitidos por la norma. Por esta razón es necesario revisar la norma y, en su caso, establecer un índice de calidad del aire, así como un programa de contingencias ambientales propio de la ciudad de Morelia.

**Palabras clave:** Norma Oficial Mexicana, partículas suspendidas PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>, contaminación.

## **Abstract**

### ***Atmospheric pollution by forest fires in Morelia, Michoacán***

In this study, the increase of PM<sub>2.5</sub> suspended particles is reported for several days in Morelia Michoacan, Mexico. This episode unprecedented happened by the combined effect of emission of pollutants into the atmosphere by fixed, mobile and area sources in adverse conditions of the state of time. The relationship found between PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and wind speed could confirm the deterioration of air quality due to forest fires and agricultural burns that occurred in the spring of 2019.

On the other hand, the Official Mexican Standard NOM-025-SSA1-2014, which establishes the limit value of 45 µg / m<sup>3</sup> and 75 µg / m<sup>3</sup> as a 24-hour average for PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, are very broad criteria, in terms unit of time, because PM<sub>2.5</sub> concentrations up to 3 times more than the values allowed by the standard were recorded from 1 to several hours. For this reason, it is necessary to review the standard and, where appropriate, establish an air quality index, as well as an environmental contingency program for the Morelia city.

**Key words:** Official Mexican standard, particles PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, pollution

## **Antecedentes**

La formación de pátinas en monumentos históricos construidos con bloques de ignimbritas en el centro de Morelia, se debe a que las partículas traídas por el viento causan depósitos en las fachadas de los monumentos; la mayoría de éstas, tienen origen antropogénico. El microanálisis detectó partículas con una composición de Azufre (S), Hierro (Fe), adición de cianobacterias y líquenes. Desde entonces, Alonso *et al.*, (2007) advirtieron que la calidad del aire por partículas totales suspendidas, podría reflexionarse como un problema de preservación de monumentos históricos.

Otro estudio realizado en una área delimitada por el periférico de la ciudad, reportaron magnetita asociada a Azufre (S), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cromo (Cr) y Plomo (Pb) en el polvo urbano de Morelia. Aguilar-Reyes *et al.*, (2011) explican que dichos agregados están documentados en (Maher *et al.*, 2008; Shilton *et al.*, 2005; Moreno *et al.*, 2003) y tal vez, la magnetita es el portador magnético que está

presente en las muestras más contaminadas de la ciudad y tiene su origen de la combustión vehicular. Gonze-Rangel (2014) realizó un estudio sobre exposición personal por partículas en usuarios del transporte público de Morelia y reportó partículas de Potasio (K), Calcio (Ca), Sodio (Na) y Aluminio (Al), las cuales tienen su origen de suelos naturales, así como el hallazgo de hollín, que es un derivado de la quema de carbón, diésel, biocombustible y biomasa.

Gómez-Peralta (2007) identificó varios indicios de contaminación atmosférica en la distribución y abundancia de líquenes y musgos de Morelia como: clorosis, cambios de coloración, necrosis y desecación. Igualmente Aguilar-Reyes *et al.* (2012) evaluaron la capacidad de las hojas de árboles de *Ficus benjamina* como depósitos de partículas de metales pesados procedentes del aire urbano de Morelia; el análisis químico de las manchas en las hojas demostró la presencia de magnetita asociada con S y metales pesados Cr, Níquel (Ni), Cu y Pb; esta relación se debe a la quema de combustible (Abdul-Razzaq y Gautam, 2001) y por desgaste del vehículo (Kim *et al.*, 2007). Por tanto, las hojas de *Ficus benjamina* de Morelia, reflejan los niveles relativos de contaminación atmosférica de esta área urbana.

Otro estudio reportó el aislamiento de las cepas *Cándida tropicalis*, *Escherichia coli*, *Streptococcus faecalis*, *Citrobacter sp*, *Staphylococcus albus* y hongos filamentosos como *Aspergillus* y *Penicillium*, contenidos en el polvo precipitado del aire de esta área urbana. Sánchez-Yáñez *et al.* (2007) disertan que el hallazgo de *S. albus* podría considerarse como un problema de salud pública, debido a que dicha bacteria se le asocia con enfermedades de la piel e infecciones de las vías respiratorias.

Los incendios forestales también son fuente de emisión significativa de partículas al ambiente (Lighty *et al.*, 2000) porque son procesos de combustión, que consume diferentes estados, tamaños y tipo de flora que crece al aire libre en un área geográfica determinada, por ejemplo las altas concentraciones de polvo observadas en verano de 1998 al oeste de los Estados Unidos se debieron a los incendios forestales ocurridos en México (Husart *et al.*, 2000); el aumento de partículas sólidas totales (PST) y PM<sub>10</sub> vistas en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) fue atribuido a la influencia de las emisiones de los incendios forestales ocurridos en 1998 (Bravo *et al.*, 2002). Otros contaminantes que se agregan a la atmósfera son: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y dióxido de azufre (Chow, 1995).

Por otra parte la Dirección de Medio Ambiente y Sustentabilidad (DMAS, 2016), adscrita a la Secretaría de Desarrollo Metropolitano e Infraestructura (SDMI) del Ayuntamiento de Morelia, reportó que en 2016 la Norma Oficial Mexicana del promedio diario de  $45\mu\text{g}/\text{m}^3$  de partículas  $\leq$  a 2.5 micras ( $\text{PM}_{2.5}$ ) fue rebasada el 1 de enero 2016 con  $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; el 30 de abril con  $49\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; los días 2, 3 y 4 de mayo con  $53\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $68\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $59\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos eventos podrían atribuirse a la influencia de las quemadas agrícolas, incendios forestales y quema de basura a cielo abierto, que ocurren en esta época del año. En 2017 se redujo a 3 días por encima de la norma; 1 de enero, 19 de mayo y 25 de diciembre (DMAS, 2018). Para el año 2018 la Dirección de Medio Ambiente (DMA, 2019), perteneciente hoy día a la Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente (SEDRUMA), informó que el criterio oficial de  $\text{PM}_{2.5}$  sólo se rebasó el 1 de enero.

No obstante lo anterior, a finales de abril y la primera quincena de mayo del 2019, la ciudad de Morelia registró altos niveles de contaminación por  $\text{PM}_{2.5}$ , según la información obtenida por Ruiz (2019), el principal factor que provocó la baja en la calidad del aire fueron los 80 incendios forestales que dejaron afectadas un total de mil 600 hectáreas de bosques y cerros de Morelia entre marzo y mayo. La calidad del aire en Morelia empeoró de tal forma que se tuvieron nueve días por encima de los valores permitidos por la norma mexicana y, debido a esto, el objetivo del presente estudio es analizar los factores que favorecieron este evento sin precedentes.

## **Metodología**

Se consiguieron los datos de los contaminantes del aire óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), partículas suspendidas ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ) y los parámetros meteorológicos temperatura (TEMP), humedad relativa (HR), radiación solar (RAD), presión barométrica (BP), precipitación pluvial (RAIN), velocidad y dirección del viento (WS, WD). La información fue proporcionada por Dirección de Medio Ambiente (DMA) adscrita a la Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente (SEDRUMA) del Ayuntamiento de Morelia. El periodo de estudio abarca del 25 de abril al 17 de mayo del 2019.

Se realizaron análisis de correlación entre los contaminantes y las variables meteorológicas para evaluar el nivel de asociación y proponer modelos de regresión lineal, que podrían explicar los factores que intervinieron en los eventos de alta contaminación por partículas suspendidas  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  que acontecieron en

primavera del 2019, en la ciudad de Morelia. En seguida se describen algunos de los principios fundamentales de este método, según Spiegel (1991).

En general si  $X$  y  $Y$  son dos variables en cuestión, un diagrama de dispersión muestra la localización de los puntos  $(X, Y)$  sobre un sistema rectangular de coordenadas. Si todos los puntos del diagrama parecen estar en una recta, la correlación es lineal entre las variables; sin embargo, aunque las variables estén relacionadas, no siempre se extienden sobre una línea recta y se dice que es una relación no lineal. Una línea recta, es el tipo más sencillo de una curva de ajuste, su ecuación puede escribirse.

$$Y = a_0 + a_1X \dots\dots\dots (1)$$

Dados cualesquiera dos puntos  $(X_1, Y_1)$  y  $(X_2, Y_2)$  sobre la recta, se pueden determinar las constantes  $a_0$  y  $a_1$ . La ecuación así obtenida se puede expresar

$$Y - Y_1 = ((Y_2 - Y_1)/(X_2 - X_1))(X - X_1) \text{ o sea } Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

donde

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

Se llama la pendiente de la recta y representa el cambio en  $Y$  dividido por el correspondiente cambio en  $X$ . Cuando la ecuación se escribe en la forma (1), la constante  $a_1$  es la pendiente  $m$ . La constante  $a_0$ , que es el valor de  $Y$  cuando  $X = 0$ , se nombra la  $Y$ -intersección.

Al construir rectas, parábolas y otras curvas de ajuste de datos es necesario acordar un concepto de "recta o curva de mejor ajuste", sí se considera que los datos vienen dados por  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$ . Para un valor dado de  $X$ , digamos  $X_1$ , habrá una diferencia entre el valor  $Y_1$  y el correspondiente valor deducido de la curva  $C$ . Denotamos esta diferencia por  $D_1$ , que se llama a veces desviación, error o residual y puede ser positiva, negativa o nula. Análogamente, asociadas a los datos  $X_2, \dots, X_N$  se obtienen desviaciones  $D_2, \dots, D_N$ .

Una medida de la bondad del ajuste de la curva  $C$  a los datos dados viene proporcionada por la cantidad  $D^2_1 + D^2_2 + \dots + D^2_N$ . Sí es pequeña o grande, el ajuste es bueno y malo respectivamente. Por tanto, de todas las curvas que aproximan un conjunto de datos, la que tiene la propiedad de que  $D^2_1 + D^2_2 + \dots + D^2_N$  es mínimo se nombra "curva de ajuste óptimo", porque ajusta los datos en el sentido de mínimos cuadrados, ecuación (1).

Donde las constantes  $a_0$  y  $a_1$  se obtienen de las ecuaciones normales

$$\begin{aligned} \sum Y &= a_0 N + a_1 \sum X \\ \sum XY &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

De las que se deduce

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \\ a_1 &= \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

Análogamente, la recta de regresión de X sobre Y es

$$X = b_0 + b_1 Y \dots\dots\dots (4)$$

Donde las constantes  $b_0$  y  $b_1$  se obtienen de las ecuaciones normales

$$\begin{aligned} \sum X &= b_0 N + b_1 \sum Y \\ \sum XY &= b_0 \sum X + b_1 \sum Y^2 \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

Obteniéndose

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{(\sum X)(\sum Y^2) - (\sum Y)(\sum XY)}{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2} \\ b_1 &= \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

Las ecuaciones (1) y (4) se pueden escribir respectivamente como

$$y = \frac{\sum xy}{\sum x^2} x \quad y \quad x = \frac{\sum xy}{\sum y^2} y \dots\dots\dots (7)$$

donde

$$x = X - \bar{X} \quad e \quad y = Y - \bar{Y}$$

Si denotamos por  $Y_{est}$  el valor de Y para valores dados de X, tal como se estima a partir de la ecuación (1), una medida de la dispersión respecto de la recta de regresión de Y sobre X viene proporcionada por

$$S_{Y,X} = \frac{\sqrt{\sum(Y - Y_{est})^2}}{N} \dots\dots\dots (8)$$

Que se llama error típico de estimación de Y sobre X.

Si se usa la recta de regresión (4), un error típico de estimación análogo de X sobre Y se define como

$$S_{X,Y} = \frac{\sqrt{\sum(X - X_{est})^2}}{N} \dots\dots\dots (9)$$

El error típico de estimación tiene propiedades análogas a las de la desviación típica. Por ejemplo si se construyen rectas paralelas a la de regresión de Y sobre X a distancias verticales respectivas  $S_{Y,X}$ ,  $2S_{Y,X}$ ,  $3S_{Y,X}$  de ella, encontramos si N es lo bastante grande que estarían incluidos entre esas rectas aproximadamente el 68%, 95% y 99.7% de los puntos muestrales. Igual que la desviación típica modificada

$$S = \frac{\sqrt{N}}{N-1}$$

Será útil para pequeñas muestras, como para un error típico de estimación modificado dado por

$$S_{Y,X} = \frac{\sqrt{N}}{N-2} S_{Y,X} \dots\dots\dots (10)$$

Por esta razón algunos estadísticos prefieren definir (8) o (9) con N-2 en lugar de N en el denominador.

La variación total de Y se define como  $\sum (Y - \bar{Y})^2$ ; esto es, la suma de los cuadrados de las desviaciones de los valores de Y respecto de la media Y

$$\sum (Y - \bar{Y})^2 = \sum (Y - Y_{est})^2 + \sum (Y_{est} - \bar{Y})^2 \dots\dots\dots (11)$$

El primer término de la derecha de la ecuación (11) se nombra variación explicada, mientras que el segundo se nombra variación inexplicada, porque las desviaciones  $Y_{est} - \bar{Y}$  tienen un esquema definido, en tanto que las desviaciones  $Y - Y_{est}$  se comportan de modo caótico e impredecible.

El coeficiente entre variación explicada y la variación total se llama coeficiente de determinación. Si la variación explicada es cero (toda la variación es inexplicada), ese cociente es 0. Si la variación inexplicada es cero (toda la variación es explicada), el cociente es 1. En los demás casos está entre 0 y 1. Como nunca es negativo, se denota ese cociente por r. La cantidad r, se nombra coeficiente de correlación y viene dada por

$$r = \pm \frac{\sqrt{\text{variación explicada}}}{\text{variación total}} = \pm \frac{\sqrt{\sum(Y_{est}-\bar{Y})^2}}{\sqrt{\sum(Y-\bar{Y})^2}} \dots\dots\dots(12)$$

Los problemas que involucran a más de tres variables, que es el caso que se presenta en este estudio, pueden tratarse de manera análoga a las descritas previamente de dos variables. Así, las ecuaciones de regresión lineales de X<sub>1</sub> sobre X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, y X<sub>4</sub> pueden escribirse

$$X_1 = b_{1.234} + b_{12.34}X_2 + b_{13.24}X_3 + b_{14.23}X_4 \dots\dots\dots(13)$$

Y representa un hiperplano en el espacio de cuatro dimensiones. Multiplicando ambos miembros de la ecuación (13) por 1, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> y X<sub>4</sub> sucesivamente y sumando, se llega a las ecuaciones normales para determinar b<sub>1.234</sub>, b<sub>12.34</sub>, b<sub>13.24</sub> y b<sub>14.23</sub>; sustituyendo estas en la ecuación (13) nos da la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de X<sub>1</sub> sobre X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> y X<sub>4</sub>. El software Statistica©6.0, empleado en este estudio, cuenta con los módulos que ejecutan el análisis de correlación y regresión lineal.

## Resultados

El términos generales la asociación entre las PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> fue de 0.68 con nivel de significancia aceptable p<0.05; en tanto que la relación de las mismas partículas con NO<sub>2</sub>, dirección del viento y humedad relativa fue mayor con 0.27, 0.27 y 0.23 respectivamente. En cambio, la velocidad del viento, temperatura y O<sub>3</sub> mostraron asociación negativa entre -0.22 y -0.15 (Tabla 1). A partir de estos valores, se plantearon varios modelos de regresión lineal.

**TABLA 1.** Matriz de correlación entre los contaminantes del aire y los parámetros meteorológicos que se miden en la caseta de monitoreo atmosférico de la ciudad de Morelia. Palacio Municipal. Las cifras en tonalidad roja, indica significancia con nivel de  $p < 0.05$ .

	NO <sub>x</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	WS	WD	TEMP	RAD	RAIN	RH	BP
NO <sub>x</sub>	1	0.86	0.94	-0.58	0.22	0.17	-0.47	0.29	-0.54	-0.33	-0.01	0.48	0.44
NO	0.86	1	0.64	-0.33	0.09	0.1	-0.37	0.15	-0.33	-0.1	-0.02	0.3	0.43
NO <sub>2</sub>	0.94	0.64	1	-0.65	0.27	0.19	-0.46	0.34	-0.59	-0.42	0	0.52	0.37
O <sub>3</sub>	-0.58	-0.33	-0.65	1	-0.1	-0.08	0.37	-0.38	0.87	0.65	-0.02	-0.76	-0.32
PM <sub>10</sub>	0.22	0.09	0.27	-0.1	1	0.68	-0.15	0.27	-0.22	0	-0.03	0.23	0.13
PM <sub>2.5</sub>	0.17	0.1	0.19	-0.08	0.68	1	-0.26	0.12	-0.21	-0.03	-0.03	0.25	0.14
WS	-0.47	-0.37	-0.46	0.37	-0.15	-0.26	1	-0.3	0.5	0.17	-0.01	-0.51	-0.59
WD	0.29	0.15	0.34	-0.38	0.27	0.12	-0.3	1	-0.47	-0.34	-0.01	0.4	0.29
TEMP	-0.54	-0.33	-0.59	0.87	-0.22	-0.21	0.5	-0.47	1	0.63	0.01	-0.81	-0.42
RAD	-0.33	-0.1	-0.42	0.65	0	-0.03	0.17	-0.34	0.63	1	-0.03	-0.53	-0.01
RAIN	-0.01	-0.02	0	-0.02	-0.03	-0.03	-0.01	-0.01	0.01	-0.03	1	0.06	-0.06
RH	0.48	0.3	0.52	-0.76	0.23	0.25	-0.51	0.4	-0.81	-0.53	0.06	1	0.41
BP	0.44	0.43	0.37	-0.32	0.13	0.14	-0.59	0.29	-0.42	-0.01	-0.06	0.41	1

El primer modelo del 25 de abril al 1 de mayo supone que el 66% de los cambios observados de las partículas PM<sub>2.5</sub> se debió a la combinación entre las emisiones de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y cambios en los valores de temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección del viento con coeficiente de correlación  $R = 0.81$  (Figura 1). Este modelo parece razonable porque incluye emisiones contaminantes propias de un área urbana, como las PM<sub>10</sub> que provienen de la combustión vehicular que contienen partículas magnéticas (Strzyszcz *et al.*, 2006; Petrovský and Ellwood, 1999), impurezas de Fe en los combustibles (Abdul-Razzaq and Gautam, 2001) y desgaste de la carrocería (Maher *et al.*, 2008). Aparte de esto las partículas magnéticas alojan en su estructura metales pesados como Pb, Zn, Ba, Cd y Cr (Muxworthy *et al.*, 2003; Harrison and Jones, 1995). Por ende, la concentración de minerales magnéticos expresa de manera indirecta el nivel de metales tóxicos, presentes en muestras de suelo y polvo urbano (Magiera *et al.*, 2006; Bityukova *et al.*, 1999).

De esta forma los valores observados de  $PM_{2.5}$  del 25 al 1 de mayo, podrían atribuirse a la mezcla de emisión de contaminantes a la atmósfera entre fuentes fijas como son: hoteles, restaurantes, hospitales, baños públicos, tintorerías, panaderías; autotransporte público, privado que se localizan y transitan en los alrededores de la caseta de monitoreo, así como cambios en las condiciones del estado del tiempo. Sin embargo, el modelo no logró explicar los altos niveles de  $PM_{2.5}$  registrados el 29 y 30 de abril, cuando el criterio oficial fue superado. Esta última descripción podría atribuirse a la poca variación explicada de 66% por el modelo, o bien que el impacto de la emisión de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  al ambiente por los incendios forestales y quemas agrícolas fue tan alto, que la mejor curva de ajuste óptima se logró con estas variables.

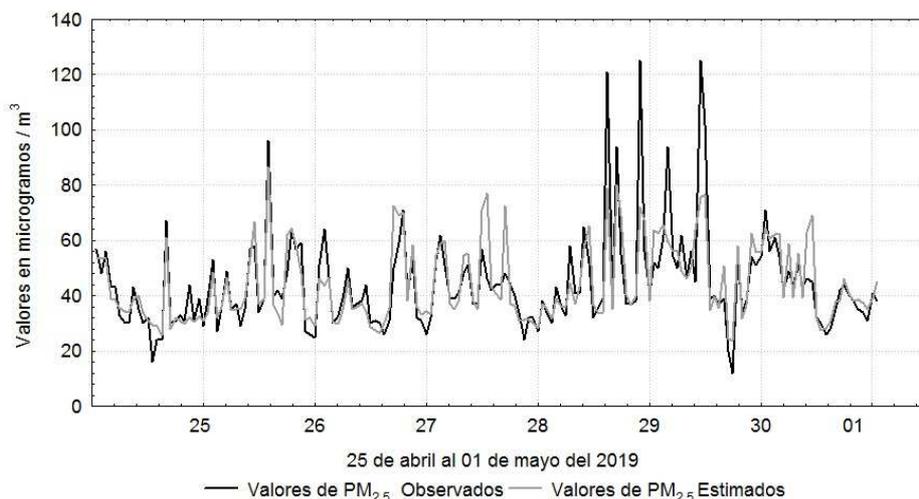
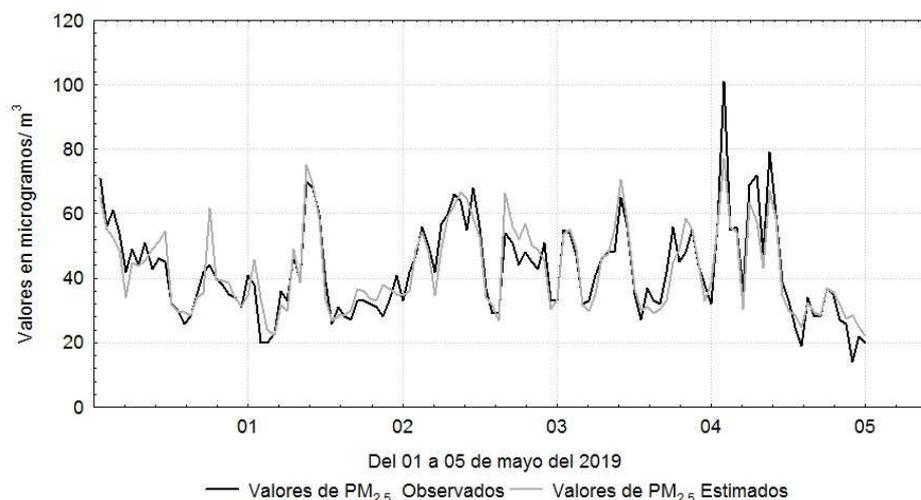


Figura 1. Evento de alta contaminación por  $PM_{2.5}$  observada en el centro de la ciudad de Morelia.

El segundo modelo del 1 al 5 de mayo propone que el 83% de las  $PM_{2.5}$  se debió a los cambios de emisión de  $PM_{10}$  con coeficiente de relación  $R = 0.91$  (Figura 2). La hipótesis es suficiente porque la relación  $PM_{10}/PM_{2.5}$  de estos contaminantes está documentada en (Echeverri-Londoño y Maya-Vasco, 2008). Esta hipótesis podría confirmar el incremento de partículas a la atmósfera urbana de la ciudad de Morelia, por los incendios forestales y quemas agrícolas que ocurren en esta época del año. Incluso los valores estimados de  $PM_{2.5}$  el 3 de mayo cuando se rebasó el valor permitido por la norma mexicana, se aproximaron bien con respecto de los

observados. Este resultado es aceptable porque el valor de variación explicada fue alto, en tanto que la curva de ajuste describió bien los datos observados.

El tercer modelo del 9 al 11 de mayo admite que las concentraciones de  $PM_{10}$  dependieron 89% de las emisiones de  $NO_2$ ,  $PM_{2.5}$ , temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento con factor de correlación  $R= 0.94$  (Figura 3). Este modelo es inverso al descrito previamente en la Figura 1, porque las  $PM_{10}$  ahora dependen de su relación con  $PM_{2.5}$  (Tabla 1). En consecuencia los valores estimados de  $PM_{10}$  se acercaron bien con respecto de los datos observados, lo cual se debió ahora al alto valor de variación explicada por las variables involucradas y la obtención de una curva de ajuste óptima. Así que la explicación de los cambios de  $PM_{10}$ , es parecida con la descripción que se abordó en el primer modelo.



**Figura 2.** Evento de alta contaminación por  $PM_{2.5}$  observada en el centro de la ciudad de Morelia.

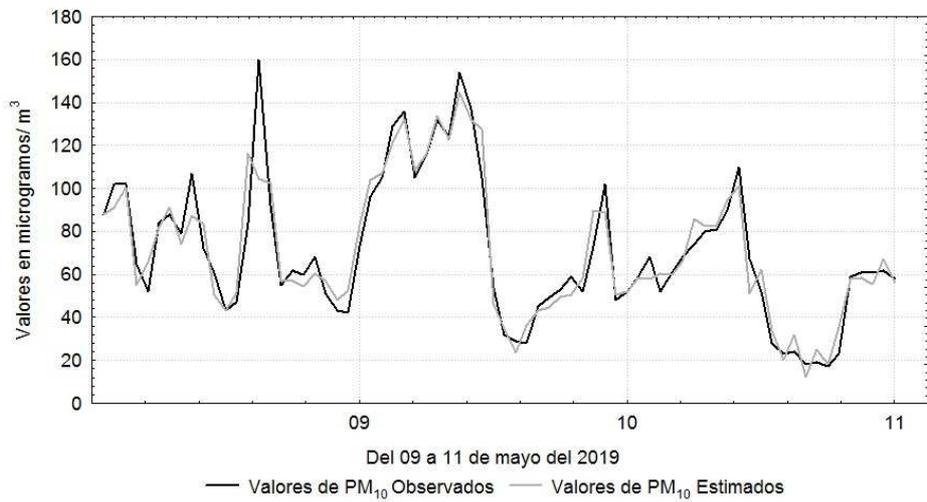


Figura 3. Evento de alta contaminación por PM<sub>10</sub> observada en el centro de la ciudad de Morelia.

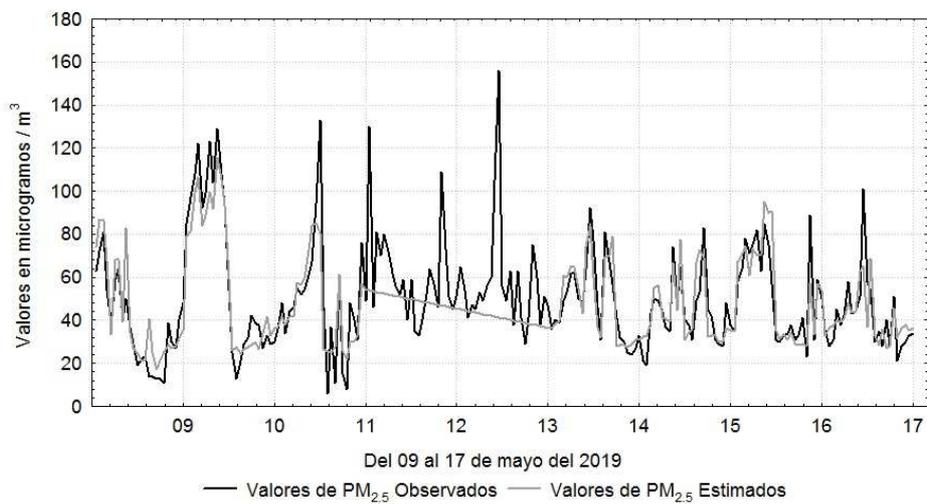


Figura 4. Evento de alta contaminación por PM<sub>2.5</sub> observada en el centro de la ciudad de Morelia.

El último modelo del 9 al 17 de mayo supone que los cambios vistos de PM<sub>2.5</sub> corresponden en 80% al efecto combinado entre las emisiones de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>,

temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento con coeficiente de correlación  $R= 0.89$  (Figura 4). Este modelo, es inverso al descrito previamente en la Figura 3, porque las  $PM_{2.5}$  ahora dependen de su relación con  $PM_{10}$  (Tabla 1). Sin embargo los valores estimados de  $PM_{2.5}$  del 11 al 13 de mayo, no coincidieron con los observados, debido a la falta de datos de  $PM_{10}$  en esos días. Pese a esto se observa un ajuste adecuado de los datos y la explicación de los cambios de  $PM_{2.5}$  es parecida a la descripción que se abordó previamente.

## Discusión

En términos generales las altas concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  registradas a finales de abril y la primera quincena de mayo del 2019, se debió a la combinación de emisión de contaminantes al ambiente por fuentes fijas, móviles y de área, en condiciones adversas del estado del tiempo, por ejemplo el descenso observado de la velocidad del viento asociado al incremento de  $PM_{2.5}$  entre el 9 y 17 de mayo (Figura 5, Tabla 1). Mientras que, el aumento de  $PM_{2.5}$  del 01 al 05 de mayo podría atribuirse en mayor medida a las fuentes de área (incendios forestales-quemas agrícolas) porque las  $PM_{2.5}$  fueron función de las  $PM_{10}$ , las cuales tiene su origen de fuentes móviles y también de suelos desnudos (tolvaneras) y las propias fuentes de área, entre otros.

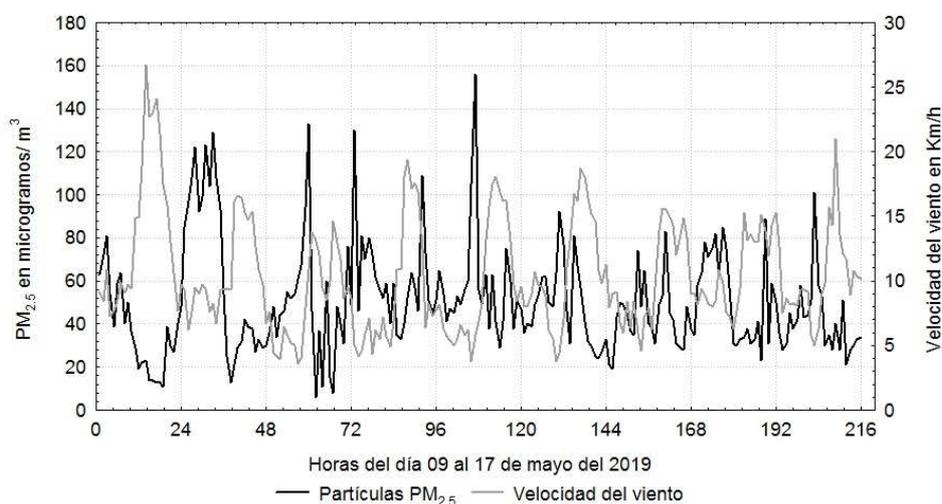


Figura 5. Evento de alta contaminación por  $PM_{2.5}$  e intensidad del viento, observado en el centro de la ciudad de Morelia.

Una importante limitación de los modelos propuestos consiste en que no aportan la contribución de cada una de las variables involucradas en el incremento de las PM<sub>2.5</sub>. Sin embargo, la incorporación de estas tuvo como resultado curvas de ajuste óptimas, que describieron debidamente los valores observados de las PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Incluso los residuales (diferencia entre valores observados y estimados) cumplieron con el principio de normalidad (Figura 6); sólo los residuales de PM<sub>2.5</sub> del 25 de abril al 1 de mayo, se desviaron poco de esta función (Figura 6A). En relación con esto, los incendios forestales y quemas agrícolas han ocurrido en la periferia de Morelia de mucho tiempo atrás y la experiencia acumulada del monitoreo atmosférico obtenido en 2016/2017 confirma que estas acciones acrecientan los niveles de contaminación por partículas suspendidas en abril y mayo (DMAS, 2017, 2018); en la primavera del 2019 no se declaró contingencia ambiental, porque al momento no se tiene establecido un programa al respecto.

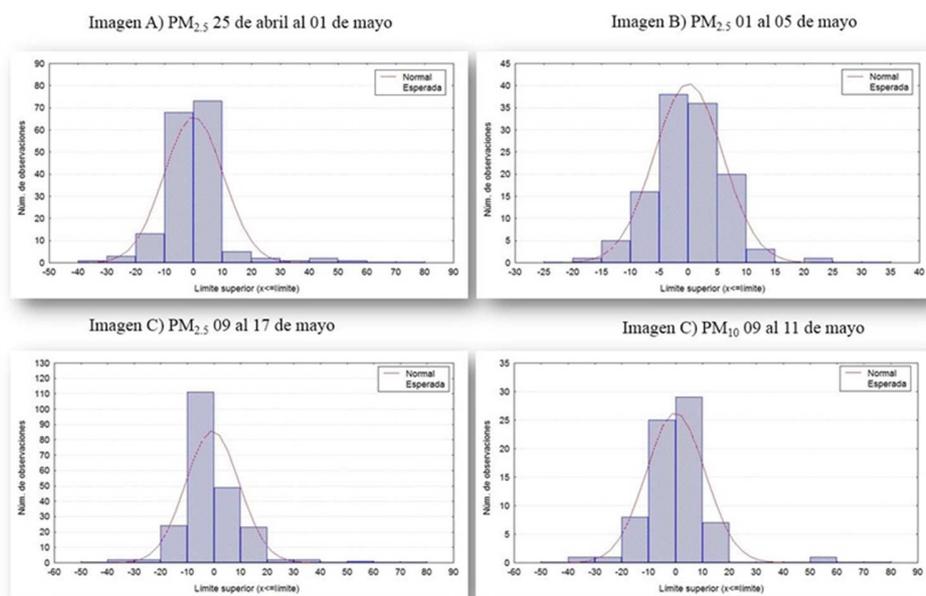


Figura 6. Histogramas de los valores residuales obtenidos de los modelos de partículas suspendidas PM<sub>10/2.5</sub>

Por otra parte la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 que establece el valor límite de 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio de 24 horas, para PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> respectivamente, son criterios muy amplios, en términos de unidad de tiempo,

**Contaminación atmosférica por incendios forestales en Morelia, Michoacán**

debido a que permite alcanzar en 1 o varias horas, concentraciones hasta 3 veces más, que los valores permitidos por dicha norma (Tabla 2; Figuras 1 y 4). Por esta razón conviene revisar este criterio, a partir de un estudio que integre las 4 estaciones de monitoreo atmosférico que existen en Morelia, con el propósito de reglamentar un índice de calidad del aire y un programa de contingencias ambientales propio de la ciudad.

**TABLA 2**

Resumen estadístico de las partículas suspendidas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> correspondiente a los días de abril y mayo del 2019. Los valores en tono gris señalan los días por encima de la norma.

	Contaminante	Mes	Día	Datos válidos	Media Aritmética	Mediana	Desviación Estándar	Valor Mínimo	Valor Máximo
1	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Abril-25	Jueves	24	37	33	12	16	67
2	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Abril-26	Viernes	24	44	39	16	25	96
3	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Abril-27	Sábado	24	41	38	12	26	71
4	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Abril-28	Domingo	24	42	42	9	24	62
5	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Abril-29	Lunes	24	51	40	26	30	125
6	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Abril-30	Martes	24	53	51	24	12	125
7	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-01	Miércoles	24	42	42	11	26	71
8	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-02	Jueves	24	36	33	13	20	70
9	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-03	Viernes	24	48	49	11	29	68
10	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-04	Sábado	24	44	45	10	27	65
11	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-05	Domingo	24	42	36	22	14	101
12	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-09	Jueves	24	38	38	20	11	81
13	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-10	Viernes	24	66	48	39	13	129
14	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-11	Sábado	24	48	47	28	6	133
15	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-12	Domingo	24	61	57	22	33	130
16	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-13	Lunes	24	58	52	26	29	156
17	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-14	Martes	24	49	47	19	24	92
18	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-15	Miércoles	24	43	43	15	19	83
19	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-16	Jueves	24	53	54	21	23	89
20	PM <sub>2.5</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-17	Viernes	24	41	37	16	21	101
	Contaminante	Mes	Día	Datos válidos	Media Aritmética	Mediana	Desviación Estándar	Valor Mínimo	Valor Máximo
1	PM <sub>10</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-09	Jueves	24	74	70	27	42	160
2	PM <sub>10</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-10	Viernes	24	84	85	40	28	154
3	PM <sub>10</sub> en µg/m <sup>3</sup>	Mayo-11	Sábado	24	55	60	25	17	110

Hoy en día, en la periferia y centro de Morelia se tiene identificado partículas suspendidas de S, Zn, Cr, Cu, Pb, carbón negro de origen vehicular, así como K, Ca, Na y Al, las cuales proceden de suelos orgánicos. Pese a esto aún se desconoce la naturaleza y estructura química de las PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en esta área urbana, desde la perspectiva del monitoreo atmosférico o bien que las muestras impregnadas en la cinta de muestreo de los analizadores de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> no se tienen identificadas de tal manera, que aporten evidencia del impacto que podría tener sobre el ambiente natural, las actividades diarias que se realizan en la ciudad y su periferia.

## **Conclusiones**

La contaminación atmosférica por partículas suspendidas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> aumenta en abril y mayo, por quemas agrícolas e incendios forestales que ocurren en la periferia de Morelia. Se recomienda detener esta práctica y persuadir a la población para cambiar gradualmente a la técnica roza-tumba-tritura.

Se reporta por primera vez un fin de semana con cinco días consecutivos por arriba del criterio oficial mexicano de PM<sub>2.5</sub>. Este evento histórico debe considerarse el preámbulo para reglamentar un índice de calidad del aire y establecer un programa de contingencias ambientales, propio de la ciudad de Morelia en el futuro inmediato.

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, que fija el valor permitido de 45µg/m<sup>3</sup> como promedio diario de PM<sub>2.5</sub> fue rebasada el 29-30 de abril con 51µg/m<sup>3</sup> y 53µg/m<sup>3</sup> respectivamente; el 3 de mayo, con 48µg/m<sup>3</sup>; los días 10, 11, 12, 13, 14 y 16 de mayo con 66µg/m<sup>3</sup>, 48µg/m<sup>3</sup>, 61µg/m<sup>3</sup>, 58µg/m<sup>3</sup>, 49µg/m<sup>3</sup> y 53µg/m<sup>3</sup> respectivamente.

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, que fija el valor permitido de 75µg/m<sup>3</sup> como promedio diario de PM<sub>10</sub>, fue excedida el 10 de mayo con 84µg/m<sup>3</sup>. Este episodio es el primero que sucede desde el año 2008.

## **Agradecimientos**

Al Dr. Enrique Rico Arzate de la Escuela Superior de Ingeniería e Industria Extractiva ESIQIE, del Instituto Politécnico Nacional, Dra. Georgina Carbajal de la Torre y la Dra. Ana Beatriz Martínez Valencia, de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por sus comentarios y sugerencias a este estudio. A la Dirección de Medio Ambiente, adscrita a la

Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente del Ayuntamiento de Morelia, por el acceso a la información para la realización de este trabajo.

## Referencias

- Abdul-Razzaq W. and Gautamm M. (2001) Discovery of magnetite in the exhausted material from a diesel engine. *Appl. Phys. Lett.*, 78, 2018-2019.
- Aguilar-Reyes, B., Cejudo, R., Martínez-Cruz., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Carvallo, C., and Morales, J. (2012) *Ficus benjamina* leaves as indicator of atmospheric pollution: a reconnaissance study. *Stud. Geophys. Geod.*, 56(2012), 879-887, DOI: 10.1007/s11200-011-0265-1. © 2012 Inst. Geophys. AS CR, Prague.
- Aguilar-Reyes, B., Bautista, F., Rosas-Elguera, J., Avto, Gogichaishvili., Cejudo, R., Morales, J. (2011) Evaluación de la contaminación ambiental por métodos magnéticos en las ciudades de Morelia y Guadalajara, México. *Latinmag Letters*, Volume 1, Special Issue (2011), D22, 1-6. Proceedings Tandil, Argentina.
- Alonso, E., Martínez, W., Rubio, J. C., Velasco, F., Chávez, H. L., Ávalos, M., Lara, C., Cervantes, E. (2007) Calidad del aire en cuatro ciudades de Michoacán, México: Su efecto sobre los materiales de construcción. *Revista de la Construcción*, vol. 6, núm. 2, 2007, pp. 66-74 Pontificia Universidad Católica de Chile Santiago, Chile.
- Bityukova L., Scholger R. and Birke M. (1999) Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24, 829-835.
- Bravo, H. A., R. Sosa E., P. Sánchez, A. & M. Jaimes P. (2002) El impacto de los incendios forestales en la calidad del aire por partículas en la zona metropolitana de la Ciudad de México. *Contaminación Atmosférica IV Simposio*. Universidad Autónoma Metropolitana, Noviembre 5-7 del 2002. Celebrado en El Colegio Nacional, México, DF, México. Publicado en el cuaderno de resúmenes.
- Chow, J. C. (1995) Measurements methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 45, 320-382.

- Cristian Ruiz, (2020). Se disparó contaminación del aire en Morelia este año. Mi Morelia. Publicado junio 3, 2019. Consultado el 01 de septiembre 2020 a las 22:22hrs. <https://www.mimorelia.com/>.
- Dirección de Medio Ambiente (DMA). (2019). Informe Anual de Monitoreo Atmosférico del Centro Histórico de Morelia. Año 2018. Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente. Ayuntamiento de Morelia. Junio 03 del 2019. Publicado en <http://bios.biologia.umich.mx/monitoreo.html>
- Dirección de Medio Ambiente y Sustentabilidad (DMAS, 2018). Informe Anual de Monitoreo Atmosférico en el Centro Histórico de Morelia Michoacán. Año 2017. Secretaría de Desarrollo Metropolitano e Infraestructura. Ayuntamiento de Morelia. Mayo 18 del 2018. Publicado en <http://bios.biologia.umich.mx/monitoreo.html>.
- Dirección de Medio Ambiente y Sustentabilidad (DMAS, 2017). Informe Anual de Monitoreo del Aire en Morelia Michoacán. Año 2016. Secretaría de Desarrollo Metropolitano e Infraestructura. Ayuntamiento de Morelia. Publicado en <http://bios.biologia.umich.mx/monitoreo.html>.
- Echeverri-Londoño, C. A., y Maya-Vasco, G. J. (2008). Relación entre las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) y respirables (PM<sub>10</sub>) en la ciudad de Medellín. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, volumen 7, No. 12, pp. 23-42 - ISSN 1692-3324 - enero-junio de 2008/197p. Medellín, Colombia
- Gómez-Peralta, M. (2007) Presencia de síntomas de contaminación del aire en los líquenes y musgos de Morelia. Programa de monitoreo atmosférico. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. Gobierno del Estado de Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 47. Editado en los talleres de gráficos Moreno 2007. Morelia, Mex.
- Gonce-Rangel, A. (2014). Determinación de los niveles de exposición a Monóxido de Carbono y Partículas PM<sub>2.5</sub>, en los usuarios del transporte público del periférico de la ciudad de Morelia, evaluando dos tipos diferente de transporte. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Química. Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Informe final de tesis de grado. Pp. 149 Año 2014.
- Harrison R. M. and Jones M. (1995). The chemical composition of airborne particles in the UK atmosphere. Sci. Tot. Environ. 168, 195-214.
- Husart, R. B., Schichtel, B. A., Falke, C. R., Wilson, W. E. (2000). Dust and smoke event over the USA in 1998. In: Proceedings of PM2000-Particulate Matter and Health, Charleston, SC, Air & Waste Management Association, Session 10AS, pp. 22-23.

- Kim W., Doh S. J., Park Y. H. and Yun S. T., 2007. Two-year magnetic monitoring in conjunction with geochemical and electron microscopic data of roadside dust in Seoul, Korea. *Atmos. Environ.*, 41, 7627–7641.
- Lighty, J. S., Veranth, J. M., Sarofim, A. F. (2000). Combustion aerosols: Factor governing their size and composition and implications to human health. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 50, 1565-1518.
- Maher B. A., Moore C. and Matzka J. (2008). Spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves. *Atmos. Environ.*, 42, 364373.
- Magiera, T., Strzyszczyk, Z., Kapińska, A., Petrovský, E., MAGPROX Team. (2006). Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma* 130, 299-311.
- Moreno, E., Sagnotti, L., Dinare s-Turrell, J., Winkler, A., Cascella, A. (2003) Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves. *Atmospheric Environment* 37, 2967–2977.
- Muxworthy A. R., Matzka J., Fernandez Davila A. and Petersen N. (2003). Magnetic signature of daily sampled urban atmospheric particles. *Atmos. Environ.*, 37, 4163-4169.
- Petrovský E. and Ellwood B.B. (1999). Magnetic monitoring of air-land-and water-pollution. In: Maher B.A. and Thompson R. (Eds.), *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Sánchez-Yáñez, J. M., Carrillo, A. J. C., Márquez, L. B., & Villegas, J. M. (2007) Detección de microorganismos patógenos oportunistas en el polvo precipitado del aire exterior de Morelia, Michoacán, México. Programa de monitoreo atmosférico. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. Gobierno del Estado de Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Pp. 47. Editado en los talleres de gráficos Moreno 2007. Morelia, Mex.
- Secretaría de Salud. (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación. *Diario Oficial de la Federación*. Miércoles 20 de agosto de 2014.
- Shilton V. F., Booth C. A., Smith J. P., Giess P., Mitchell D. J., Williams C. D. (2005) Magnetic properties of urban street dust and their relationship with organic matter content in the West Midlands, UK *Atmospheric Environment* 39, 3651–3659.

- Spiegel, Murray, R. (1991) Estadística. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. Impreso en España.
- Strzyszcz Z., Magiera T. and Heller F. (2006). The influence of industrial emissions on the magnetic susceptibility of soils in Upper Silesia. Stud. Geophys. Geod., 40, 276-286.