

Efecto de los parámetros meteorológicos sobre la concentración de partículas PM2.5 en ciudades del estado de Guanajuato

Valeria Michel Villafaña L., Melissa Odalys Chacón G., José González V., Salvador Trejo C., Lirio Alba Del Rocío Yamada., Adrián Zamorategui M.

División de Ingenierías, Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental. Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. AV. Juárez #77; Zona centro; Guanajuato, México. CP. 36000.
vm.villafanalira@ugto.mx., mo.chaconguzman@ugto.mx., j.gonzalezvargas@ugto.mx., s.trejocorral@ugto.mx.,_ladr.yamadadelacruz@ugto.mx., zamorategui@ugto.mx

Resumen

Las partículas PM2.5 presentes en el aire generan riesgos a la salud, impactos al medio ambiente y contribuye al cambio climático por su tamaño, morfología y composición. Se realizó un análisis del efecto de las variables meteorológicas sobre la concentración de partículas PM2.5 en algunos municipios del estado de Guanajuato. La información analizada se obtuvo de los registros de varias instituciones como la Secretaría del Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial, la Fundación Guanajuato Produce y de estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua. Para la representación gráfica de los promedios anuales y ménsulas se utilizó el software Origin 8.5. En general, la precipitación, humedad relativa y velocidad del viento presentan un comportamiento inverso a la concentración de las PM2.5, esto es que, cuando la concentración de PM2.5 aumenta, las variables disminuyen. La temperatura tiene un efecto positivo sobre la concentración en mayo y un efecto negativo en diciembre. Los promedios anuales de la concentración de las PM2.5 rebasan el límite máximo permisible de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Palabras clave: Material particulado, PM 2.5, Parámetros meteorológicos, Guanajuato.

Introducción

Actualmente la contaminación del aire es uno de los temas que están llamando la atención por sus efectos a la salud (Tian et al., 2021; Wang & Ogawa, 2015). Los cambios en la composición de la atmósfera son causados por el aumento poblacional en las ciudades, puesto que suelen ser alteradas las concentraciones de las sustancias presentes en ella, integrándose otras sustancias tóxicas que alteran la calidad del aire (Zalakeviciute et al., 2018). Como resultado, los ecosistemas, los materiales y la salud de las personas sufren sus efectos. Para definir la calidad del aire, se han establecido contaminantes criterio como son: monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), Óxido de nitrógeno (NO_x), óxido de azufre (SO_x) y partículas. De estos, las partículas definidas como material particulado atmosférico (PM10 y PM2.5) se encuentran entre los contaminantes más comunes en las ciudades (Gómez, 2017).

El material particulado es una mezcla compleja de partículas sólidas y/o líquidas presentes en la atmósfera, con propiedades físicas y químicas de acuerdo a su composición, definida en base a la fuente que lo genera, manteniéndose suspendidas en el aire dependiendo de su tamaño (DOF, 2014; García et al., 2019; Zhou et al., 2020). Su origen puede ser natural, tal como las partículas de composición mineral, erupciones volcánicas y las partículas biogénicas (por ejemplo, el polen, esporas, restos de plantas, virus, entre otros); o antropogénico, entre estas causas destacan el uso de vehículos, las actividades agrícolas y ganaderas, la combustión y actividad industrial (Campo et al., 2017). Según el diámetro que presenten estas partículas, pueden clasificarse en: menores o iguales a 10 micras (PM10), menores o iguales a 2.5 micras (PM2.5) y menores o iguales a 0.1 micras (PM0.1) (García et al., 2019; Zhou et al., 2020)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido criterios para definir una buena calidad del aire a emitiendo valores guía para los contaminantes criterio. En el caso del material particulado, establece un límite máximo permisible de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual para PM10. Por otro lado, para una exposición de duración corta, establece para un promedio de un día (24 horas) un valor de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Campo et al., 2017). México tiene sus propios parámetros legalmente establecidos para estos contaminantes, los cuales se encuentran en la *Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. Esta establece, para las PM10, un límite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual, y un límite en 24 horas de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para las PM2.5 establece un límite como promedio anual de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y un límite promedio de 24 horas de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (DOF, 2014)

Se han reportado que las partículas PM2.5 pueden generar mayores daños a la salud por su tamaño que les permite entrar hasta los alveolos pulmonares en comparación con las PM10, estableciendo una relación íntima entre la

concentración de material particulado y hospitalizaciones por complicaciones respiratorias (Unal et al., 2011). Según la OMS, más de 2 millones de muertes prematuras son causadas por la contaminación del aire en (Adam, 2013). No obstante, es posible reducir estas defunciones un 15%, reduciendo, por ejemplo, los PM10 de 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (Unal et al., 2011).

La concentración de material particulado en las ciudades es generada principalmente por las fuentes antropogénicas, la topografía y afectada por las variables meteorológicas (Zalakeviciute et al., 2018). Se ha reportado que la contaminación atmosférica varía de acuerdo con la estabilidad atmosférica, y en el periodo de lluvias, esta tiende a disminuir por el efecto de arrastre de las partículas, disminuyendo su concentración (Amador, J, González, V, Balderrama, J.P, Cerecedo, P, López, J, Rivera, I, Suárez, 2013; Bhaskar & Mehta, 2010; Tian et al., 2021; Wang & Ogawa, 2015). Adicionalmente, la humedad relativa y el viento afecta la dispersión de contaminantes en el aire, alterando su calidad (Bhaskar & Mehta, 2010).

Estudios referentes al efecto de las variables meteorológicas y las partículas en el aire, han reportado que la lluvia, la humedad relativa, la velocidad el viento y la temperatura establecen una relación inversa respecto a la concentración de las partículas en el aire como son las PM2.5 y PM10. (Adam, 2013; Bhaskar et al., 2011; Cichowicz et al., 2020; Pohjola et al., 2002; Tian et al., 2021; Unal et al., 2011; Zalakeviciute et al., 2018)

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar la relación que existe entre los parámetros meteorológicos, como la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación, con respecto a la concentración de las PM2.5 en las ciudades de Irapuato, Salamanca, Celaya y San Miguel de Allende del Estado de Guanajuato para determinar la calidad del aire.

Metodología

Se realizó una investigación bibliográfica y búsqueda de bases de datos referentes al monitoreo del material particulado PM2.5 y las variables meteorológicas como son la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y la velocidad del viento principalmente. Se consultó la información anual referente al monitoreo de las PM2.5 en las ciudades de Irapuato, Salamanca, Celaya y San Miguel de Allende en la página de la Secretaría y Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT), la cual fue utilizada en este estudio para su análisis y discusión. De cada municipio se eligió una estación de monitoreo de la calidad del aire para analizar los datos (Figura 1). El monitoreo de los parámetros meteorológicos y su registro se consultó en la página de la Fundación Guanajuato Produce A.C. (FGP) (SMAOT, 2022; FGP, 2022).

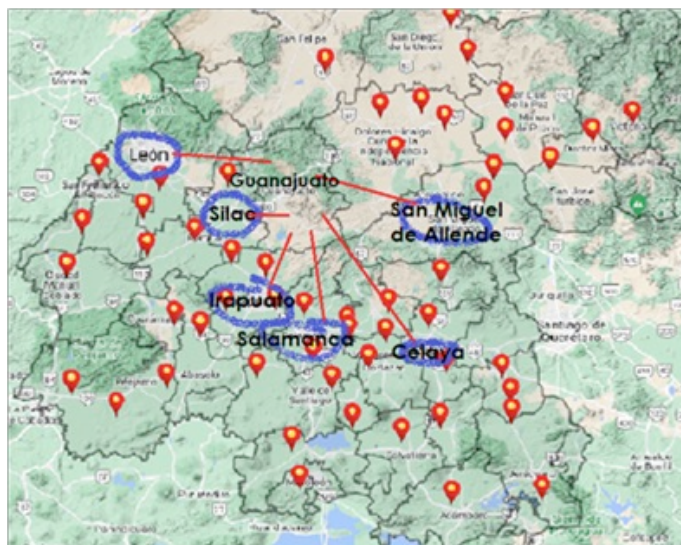


Figura 1. Municipios en el estado de Guanajuato seleccionados para el estudio: San Miguel de Allende, Salamanca, Celaya e Irapuato.

Se obtuvieron los promedios mensuales y anuales de cada variable para cada municipio, usando el programa Excel. Para una mejor representación gráfica y análisis de los promedios se utilizó el software OriginPro 8.5. Con el objeto de definir la magnitud en que las variables meteorológicas y la concentración de las partículas se correlacionan, se

determinaron los factores de correlación de Pearson de las dichas variables con respecto a la concentración de las PM_{2.5}. Este factor adquiere un valor entre -1 y 1, en donde -1 indica que las variables se comportan de manera inversa; el 0 significa que ambos datos no tienen relación alguna; y finalmente, un factor igual a 1 indica una relación directa entre las variables.

Posteriormente, se analizaron las gráficas con factores de correlación de Pearson, para establecer las relaciones entre variables meteorológicas estudiadas con relación a las concentraciones de las PM_{2.5} y finalmente compararlas con los límites máximos permisibles para definir la calidad del aire de cada ciudad.

Resultados y discusión

San Miguel de Allende

La variación de la concentración de PM_{2.5} con respecto a las variables meteorológicas se muestran en la figura 2. Se puede observar que la concentración de la PM_{2.5} tiene una tendencia a aumentar del 2017 al 2021, teniendo un máximo de concentración en el 2019 de 13.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, en el 2020 se observa una disminución en la concentración a 12.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, incrementándose nuevamente en el 2021 a 12.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento en los últimos dos años se puede atribuir a la contingencia del COVID-19 que inicio a principios del año del 2020 y a partir del mes de marzo se implementó el confinamiento para contrarrestar la contingencia y con ello se disminuyó la circulación vehicular y la actividad turística. Todos los años rebasan el límite máximo permisible (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) a excepción del 2017 que registro la mínima concentración de 11.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto a la variación de la temperatura en el periodo del 2017 a 2021, esta tiende a disminuir mostrando un máximo en el año 2018 y un mínimo en el año 2021. En base al factor de correlación entre la temperatura y la concentración de PM_{2.5}, con un valor de -0.59, se puede decir que estas dos variables tienen relación inversa de acuerdo con el signo negativo que presenta el factor.

En cuanto la precipitación, en la figura 2 se observa una tendencia a disminuir del año 2017 al 2021. El máximo registro se obtuvo en el año 2018 con 54.28 mm y el mínimo en el año 2020 con 16.53 mm. Sin embargo, en los años 2017, 2019 y 2021 de forma particular presentaron una tendencia positiva. El factor de correlación de Pearson determinado para la precipitación y la concentración de las PM_{2.5} tiene un valor de 0.16 el cual refleja una débil correlación entre las variables. Esto se puede observar en la figura 2, donde se tuvo el máximo de precipitación (54.28 mm) con un ligero aumento de la concentración (12.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) respecto al año anterior, y para el año 2020 donde se obtuvo un mínimo de precipitación (16.53 mm) la concentración de PM_{2.5} (12.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) disminuyó. La humedad relativa tiene un comportamiento semejante a la precipitación, ya que en el año 2018 presenta un máximo de 62.33%, y el mínimo de 56.62% en el año 2020. Sin embargo, en el 2017, 2019 y 2021 la HR se mantuvo constante a pesar del ligero aumento de la precipitación de los mismos años. De acuerdo con el factor de correlación de -0.10, calculado para la HR y la concentración de las PM_{2.5} muestra una relación nula entre estas dos variables. Por lo que es importante mencionar que hay más variables que influyen en el comportamiento de la concentración de las PM_{2.5}.

Para la velocidad del viento (WS) se observa que tiene tendencia a disminuir del año 2017 al 2021. En base a los datos obtenidos, el mínimo se registra en 2021 con una WS (0.90 m/s) y el máximo en 2020 con una WS (1.35 m/s). Mientras que, en el 2017 y 2019 hubo una disminución. Por consiguiente, el factor de correlación obtenido para la WS y la concentración de las PM_{2.5}, fue de -0.23, lo que nos dice que hay una correlación inversa débil. Esto se muestra en la figura 2 en el año 2021 donde tenemos el mínimo de WS (0.90 m/s) la concentración de PM_{2.5} (12.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) es alta, y para el año 2020 el máximo de WS (1.35 m/s) la concentración de PM_{2.5} disminuyó ligeramente (12.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) con respecto a los años anteriores.

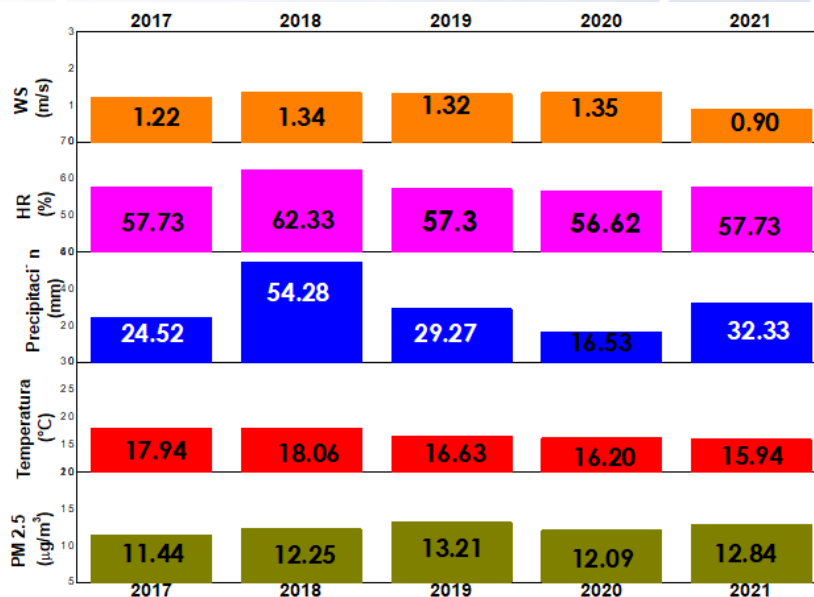


Figura 2. Promedios anuales de los parámetros meteorológicos: temperatura, humedad relativa (HR), velocidad del viento (WS) y precipitación (PP), y la concentración PM2.5 en el periodo 2017-2021

En la figura 3 se muestran las variaciones meteorológicas y la concentración de PM 2.5 mensuales del año 2017 al 2021. Se observa que la concentración de PM 2.5 tiene una tendencia a aumentar de marzo del 2017 a mayo del 2021. Por lo general, los máximos de concentración se registran en mayo y en diciembre con menor intensidad. Los mínimos se registran en los meses de junio a octubre posteriores a la época de lluvias. De septiembre de 2020 hasta abril de 2021 se ve significativamente un ascenso de la concentración de PM 2.5 de (23.08 µg/m³) asociado al reinicio de algunas actividades económicas que se suspendieron por la pandemia. Sin embargo, debido a un segundo paro de actividades, en mayo del 2021 hasta octubre se ve un descenso de la contaminación de (7.91µg/m³) atribuido a la pandemia COVID19.

Ahora bien, la variación de la temperatura tiene tendencia a disminuir de 2017 a 2022, observándose los mínimos en diciembre o enero de cada año coincidiendo con la época de invierno. Los máximos de temperatura se registraron en los meses de abril y mayo de cada año. En base al factor de correlación entre la temperatura y la concentración de PM 2.5, con un valor de -0.27 , estas dos variables tienen una correlación negativa débil. Por ello se puede decir que los cambios de temperatura tienen poca influencia sobre la concentración PM 2.5.

Por otra parte, por lo general la precipitación se produce en los meses de junio a septiembre de cada año. Para junio y julio del 2017 se mantuvo una precipitación constante de (74 mm) descendió en agosto y ascendió de nuevo en septiembre con (96.2 mm). En junio de 2018 se obtuvo el máximo de precipitación (276.80 mm) y un mínimo de concentración PM 2.5 (9.09 µg/m³). De la misma forma, en septiembre del mismo año se presenta otro ascenso de precipitación (113.60 mm) y descenso de concentración PM2.5 (8.31 µg/m³). Y hasta agosto del 2019 se vuelve a observar una precipitación significativa igual que la de septiembre del año anterior, y la concentración también se mantiene. Además, para julio de 2020 se presenta un máximo de precipitación (107 mm) y de concentración PM 2.5 (11.13 µg/m³). En septiembre de 2021 se muestra el último pico alto de precipitación (117 mm), y la concentración PM 2.5 (7.82 µg/m³) disminuye a comparación del mes anterior. De acuerdo con el factor de correlación (-0.49) de la precipitación y la concentración de PM 2.5, estas dos variables se relacionan moderadamente y de forma inversa.

Con respecto a la HR, ésta se mantiene casi constante del 2017 a 2021. En abril de 2017 se muestra el primer mínimo de HR (40.3%) y en septiembre el máximo de (75.5%), así como un descenso en la concentración PM 2.5 (8.81 µg/m³) siendo el mínimo de este año. Además, en marzo de 2018 descendió la HR (41.60%) y la concentración de PM 2.5 (14.16 µg/m³) a comparación al mes anterior; en septiembre ascendió la HR (78.90%) considerablemente y aumento la concentración de PM 2.5 (8.31 µg/m³). A lo largo del 2019 el mínimo se dio en abril con una HR (33.10%) y un ascenso en la concentración PM 2.5 (18.09 µg/m³) y el máximo en octubre (75.40%) y un aumento en la contaminación de 8.60 µg/m³. Durante abril del 2020 se

presentó el pico más bajo de HR (35.10%) y un ascenso en la concentración PM 2.5 ($14.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En septiembre se dio el pico alto de HR (74.50%) y aun pequeño aumento de concentración PM 2.5 ($7.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a diferencia del mes anterior. Observamos que para el 2021 el pico mínimo de HR (34.90%) se da en febrero y el máximo (77.90%) se presenta nuevamente en septiembre como en 2017 y 2018, y la concentración asciende para los 2 casos. De acuerdo con el factor de correlación de -0.82 , calculado para la HR y la concentración de las PM 2.5 muestra una relación negativa fuerte entre estas dos variables indicando que cuando una aumenta la otra disminuye.

La variación de la velocidad del viento se muestra en la figura 3, tiene tendencia a disminuir de 2017 al 2021. En los meses de abril, junio, septiembre y octubre se tienen los máximos de WS y una disminución en la concentración de PM 2.5. Por lo general, los mínimos se observan en mayo, noviembre y diciembre, concordando con los máximos de la concentración de PM 2.5. En el mes de abril de 2017 se observa el máximo que tiene mayor elevación de WS (1.83 m/s) de ese año, aunque se presentan otros picos en junio y octubre, la concentración de PM 2.5 es baja respecto a los demás meses. Para el mes de julio y agosto se tienen mínimo con una WS (0.95 m/s y 0.98 m/s), y otro en diciembre de (1.07 m/s), la concentración de 2.5 aumenta. En 2018 el máximo con mayor elevación se observa en abril con una WS (1.93 m/s) con una concentración de PM 2.5 ($15.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En enero, abril, agosto y octubre se registran otros máximos, con disminución en la concentración de PM 2.5. En noviembre se muestra un mínimo de WS (0.72 m/s) más bajo del año, con una concentración ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mayor a la del mes anterior ($7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Para el 2019 el máximo con mayor elevación se da en junio con una WS (1.78 m/s) y una disminución en la concentración de PM 2.5 ($8.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observan otros picos en febrero y septiembre con disminuciones en la concentración PM 2.5. el mínimo más significativo se registra en noviembre con una WS (0.90 m/s) y un aumento en la concentración de PM 2.5 ($12.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Además, en junio de 2020 se vuelve a observar el máximo de WS (1.83 m/s) muy significativo, con una disminución en la concentración de PM 2.5 ($9.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El mínimo más bajo se registró en septiembre con 0.65 m/s y aumento en la concentración PM 2.5 ($7.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observan otros mínimos en mayo y diciembre no mayores al de septiembre para este año. En 2021 la WS muestra dos máximos correspondientes a los meses de febrero y junio respectivamente y el mínimo en diciembre. El factor de correlación de Pearson obtenido entre la WS y la concentración de PM 2.5, es de 0.18 , lo que nos indica un valor de correlación positiva débil.

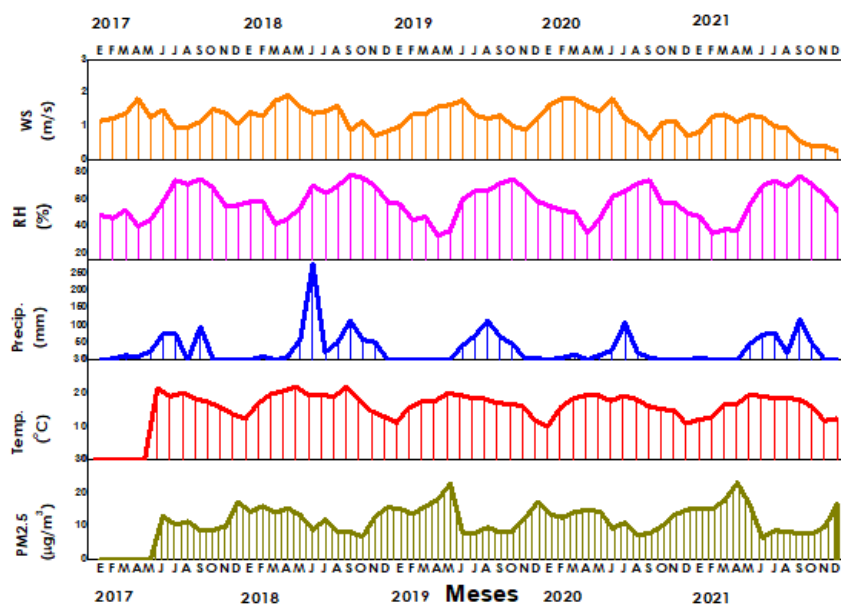


Figura 3. Variación de los promedios mensuales de los parámetros meteorológicos: temperatura, humedad relativa (HR), velocidad del viento (WS) y precipitación (PP), y concentración PM2.5 en el periodo 2017-2021

Irapuato

La figura 4 muestra la variación de la concentración de PM2.5 y las variables meteorológicas en la ciudad de Irapuato durante 2017 a 2021. La mayor concentración ($63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM2.5 se registró en el año 2017, concordando con la máxima temperatura registrada en ese año. La concentración de PM2.5 tiene una tendencia a disminuir con el mínimo de concentración registrada en el 2018 con $18.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual manera la temperatura muestra una tendencia a

disminuir con el mínimo registrado en el 2021 con 19.98 °C. El factor de correlación de Pearson para estas dos variables tiene un valor de 0.61 indicando una correlación directamente proporcional fuerte. Cuando la temperatura aumenta, la concentración también aumenta. Los promedios anuales se encuentran por arriba del límite máximo permitido de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La precipitación y la humedad relativa muestran un comportamiento oscilante durante el 2017 al 2021 mostrando el máximo más pronunciado en el 2018 y un segundo máximo ligero en el 2021. El mínimo se observa en el 2019 con 40.68 mm de precipitación y 41.24% de HR. El factor de correlación de Pearson entre la precipitación y la concentración de PM2.5 con un valor 0.34 indicando una relación directamente proporcional moderada, y para la humedad relativa y la concentración de PM2.5 se obtuvo un valor de 0.45 indicando una correlación también moderada y directamente proporcional. La velocidad del viento con un comportamiento oscilante registra un mínimo de 1.89 m/s en el 2019 y el máximo en al 2020 con 2.32 m/s. Gráficamente no se puede determinar el efecto de la velocidad del viento sobre la concentración anual. El factor de correlación para estas dos variables con un valor de 0.32 demuestra una correlación moderada y directamente proporcional.

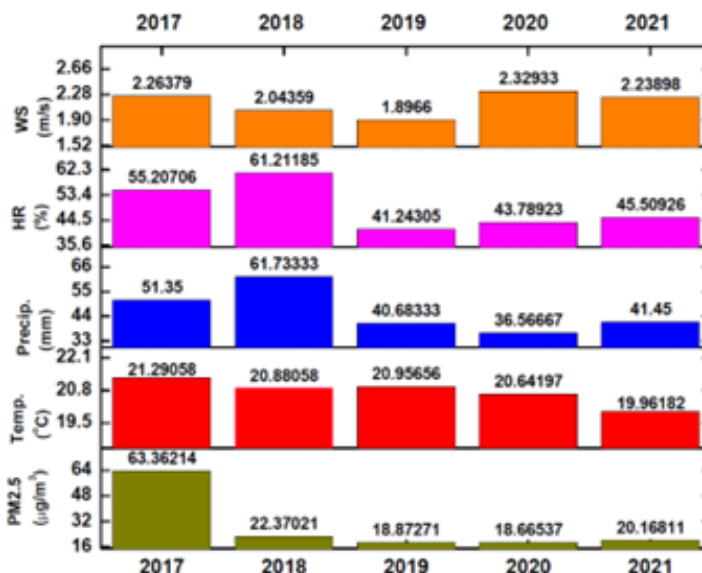


Figura 4. Promedios anuales de los parámetros meteorológicos: temperatura (°C), humedad relativa (HR%), velocidad del viento (WS m/s) y precipitación (PP mm), y la concentración PM2.5 en el periodo 2017-2021.

La figura 5 muestra la variación mensual de los promedios de la concentración de PM2.5 y las variables meteorológicas. De forma general los máximos de la concentración de PM2.5 se muestran se registran en los meses de mayo y diciembre de cada año. Los máximos de la concentración del mes de mayo concuerdan con los máximos de temperatura coincidiendo con la época de sequías y los incendios forestales o de pastizales. De igual manera, en la primavera se favorece la emisión de partículas biológicas como el polen. Por otro lado, el máximo de concentración registrado en el mes de diciembre se puede atribuir a la estabilidad atmosférica por las bajas temperaturas en invierno que generan un estancamiento de contaminantes y poca dispersión de PM2.5. El factor de correlación entre la temperatura y la concentración de PM2.5 con un valor de -0.06 muestra una correlación nula, concordando con lo antes expuesto.

Con respecto a la precipitación se puede observar que la temporada de lluvias coincide con los meses de junio a septiembre, concordando con un periodo en el que la concentración de las PM2.5 va disminuyendo. Por lo general el mínimo de concentración se registra en el mes de octubre cuando las lluvias están finalizando. Esto refleja el efecto depurador de la precipitación al promover la deposición húmeda de las partículas. El factor de correlación de Pearson para estas dos variables tiene un valor de -0.23 indicando una correlación inversamente proporcional débil. Este mismo comportamiento se observa con la variación de la HR que aumenta en la época de lluvias durante los meses de julio a octubre principalmente. En este periodo la concentración de las PM2.5 disminuyen significativamente. El factor de correlación entre la HR y la concentración de PM2.5 tiene un valor de -0.06 indicando una nula relación.

La variación de los promedios mensuales de la velocidad del viento desnutra que en noviembre diciembre se registran las mínimas velocidades, concordando máximas concentraciones de PM2.5 en invierno. Máximas velocidades se registran en los meses de febrero y marzo concordando con mínimas de la concentración de PM2.5. Este mismo efecto

se observa en los meses de septiembre octubre. El factor de correlación de Pearson (-0.14) indica una débil correlación entre estas dos variables.

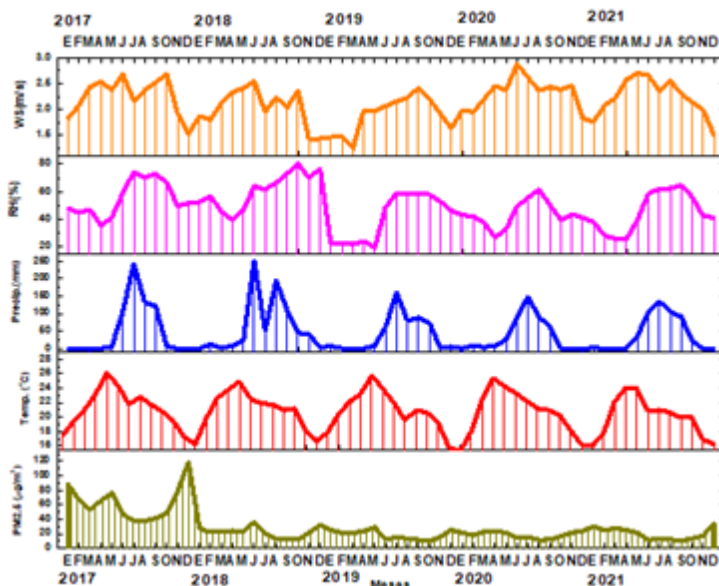


Figura 5. Variación de los promedios mensuales de los parámetros meteorológicos: temperatura, humedad relativa (HR), velocidad del viento (WS) y precipitación (PP), y concentración PM2.5 en el periodo 2017-2021.

Salamanca

La variación de la concentración anual de la PM2.5 y las variables meteorológicas del 2017 al 2021 en la ciudad de Salamanca se muestra en la figura 6. La concentración de PM2.5 durante el periodo de estudio muestra una tendencia a disminuir, teniendo un máximo en el 2017 de $22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo en el 2020 de $19.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto a la temperatura, esta no presenta una variación significativa en el mismo periodo, registrando el máximo en el 2019 de 21.8°C y un mínimo en el 2021 de 19.05°C . El factor de correlación de Pearson para estas dos variables tiene un valor de -0.52, lo que indica una correlación indirecta fuerte, es decir que cuando la temperatura aumenta, la concentración de las PM2.5 disminuye.

Por otro lado, la precipitación durante el mismo periodo presenta una tendencia a aumentar con una variación oscilante, con máximos en el 2018 y 2021 de 50.8 mm y 52.95 mm respectivamente, y mínimos en el 2017 de 34.97 mm y en el 2020 de 30.37 mm. El factor de correlación de Pearson entre la precipitación y la concentración de las PM2.5 tiene un valor de 0.13, indicando una correlación directa débil entre dichas variables. Esto no concuerda con lo establecido por varios autores que afirman una relación inversa.

De manera similar, la humedad relativa en el transcurso del periodo estudiado presenta una variación ligeramente oscilante, presentando máximos en el 2018 y 2021 de 52.8% y 53.65% respectivamente, y mínimos en el 2017 de 47.53% y en el 2020 de 44.23%. El factor de correlación de Pearson que establecen la humedad relativa y la concentración de PM2.5 tiene un valor de 0.26, lo que indica una relación directa débil entre estas variables. Nuevamente, esto es contrario a lo establecido por los autores consultados que expresan una relación inversa.

Por su parte, la velocidad del viento manifiesta una tendencia a disminuir durante este mismo periodo, presentando un máximo en el 2020 de 2.75 m/s y un mínimo en 2021 de 1.35 m/s. El resultado del factor de correlación de Pearson entre esta variable y la concentración de PM2.5 arroja un valor de 0.14, lo que expone una relación directa débil entre estas variables, lo cual difiere con lo presentado por la bibliografía consultada.

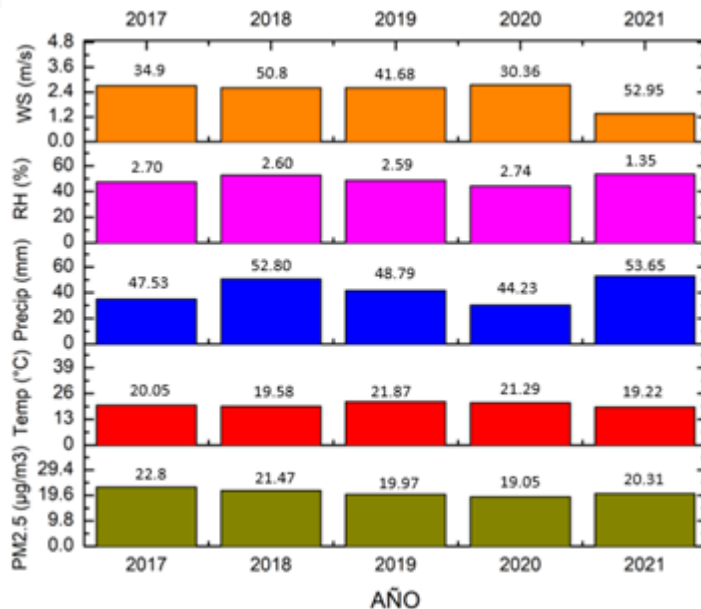


Figura 6. Promedios anuales de los parámetros meteorológicos: temperatura, humedad relativa (HR), velocidad del viento (WS) y precipitación (PP), y la concentración PM2.5 en el periodo 2017-2021.

La variación de la concentración mensual de las PM2.5 y las variables meteorológicas del 2017 al 2021 en la ciudad de Salamanca se muestra en la figura 7. La concentración de PM2.5 durante este periodo presenta picos en los meses de mayo y diciembre principalmente, y mínimos en los meses de agosto, septiembre y octubre. Los máximos de la temperatura durante el mismo periodo se presentan en los meses de mayo generalmente y sus mínimos en los meses de diciembre o enero. La relación directa de las concentraciones de PM2.5 y la temperatura notada en los meses de mayo es contrario a lo establecido por los autores consultados, no obstante, se atribuye a otros factores presentes durante dicho mes, tales como el aumento de incendios forestales debido a las altas temperaturas y la liberación de partículas naturales durante la primavera, como es el caso del polen.

Por su lado, durante los años estudiados, la precipitación presenta precipitaciones nulas desde diciembre hasta marzo, y máximos durante los meses de julio y agosto mayoritariamente, coincidiendo estos aproximadamente con los mínimos de concentración de PM2.5. De manera similar, a lo largo del periodo analizado, los máximos de la humedad relativa se encuentran en los meses de julio, agosto y septiembre, y los mínimos durante abril y mayo principalmente, siendo este comportamiento inverso al de las concentraciones de PM2.5. Por otra parte, la velocidad del viento presenta mínimos durante los meses de diciembre, enero y mayo en su mayoría, y mínimos en junio y octubre generalmente. Dicho comportamiento, con relación al de las concentraciones de PM2.5, es inverso y concuerda con los autores consultados.

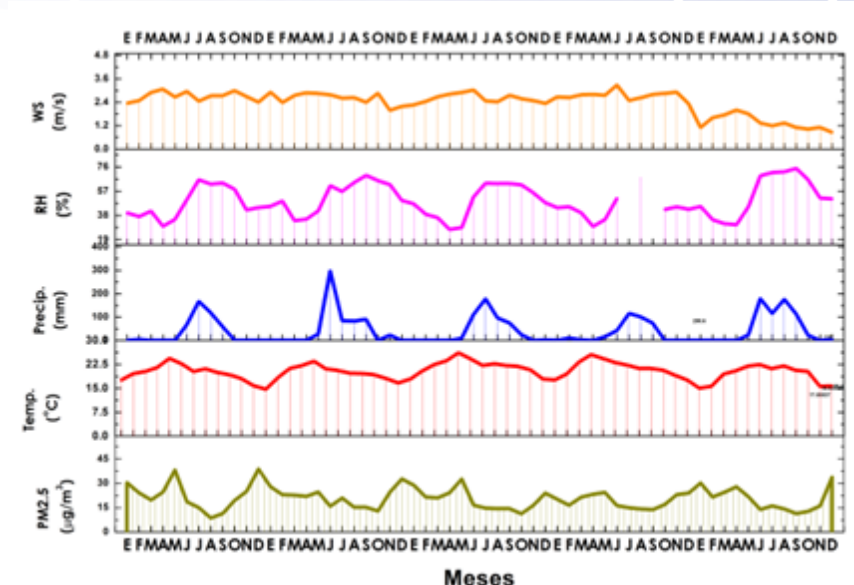


Figura 7. Variación de los promedios mensuales de los parámetros meteorológicos: temperatura, humedad relativa (HR), velocidad del viento (WS) y precipitación (PP), y concentración PM2.5 en el periodo 2017-2021.

Celaya

En la figura 8 se muestra la variación de la concentración de PM2.5 y las variables meteorológicas. Se puede conservar que la concentración de PM2.5 tiene una tendencia disminuir del 2017 al 2021. La máxima concentración se registró en el 2017 con $24.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mínima en el 2020 con $18.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para esta ciudad la concentración anual rebasa el límite máximo permisible de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La temperatura muestra los máximos en el 2019 y 2020 con $20.99 \text{ }^\circ\text{C}$ y $20.79 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente. Los mínimos se registraron en el 207 y 2018 con 20.06 y $20.02 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Durante el periodo de estudio muestra una tendencia a aumentar. El factor de Pearson para la concentración y la temperatura (-0.8) indicando una alta correlación directa entre estas variables. Los máximos de precipitación se registraron en el 2018 con 66.7 mm y el 2021 con 62.1 mm ; el mínimo en el 2020 con 35.4 mm de agua. El factor de correlación de Pearson de (-0.01) para la concentración de PM2.5 y la precipitación muestran una nula correlación. La humedad relativa presenta un máximo en 2018 con 59.7% y los mínimos se observan en el 2020 y 2017 con 53.3% y 54.3% respectivamente. Esta variable tiene un comportamiento similar a la precipitación, ya que el aire se humedece con las lluvias incrementando la humedad. El factor de correlación de Pearson con respecto a esta variable y la concentración es de -0.06 indicando nula relación.

Finalmente, la velocidad del viento presenta una tendencia a disminuir del 2017 al 2021. Presenta un máximo de vientos ligeros en el 2017 de 1.1 m/s y el mínimo de vientos en calma lo registró en el 2020 de 0.4 . El factor de correlación de Pearson relacionado a la concentración de PM2.5 y esta variable tiene un valor de 0.68 indicando una correlación fuerte positiva. Es decir, cuando la velocidad del viento aumenta, la concentración de PM2.5 aumenta. Esto no concuerda con lo reportado por otros autores, por lo que es necesario sus análisis a corto tiempo.

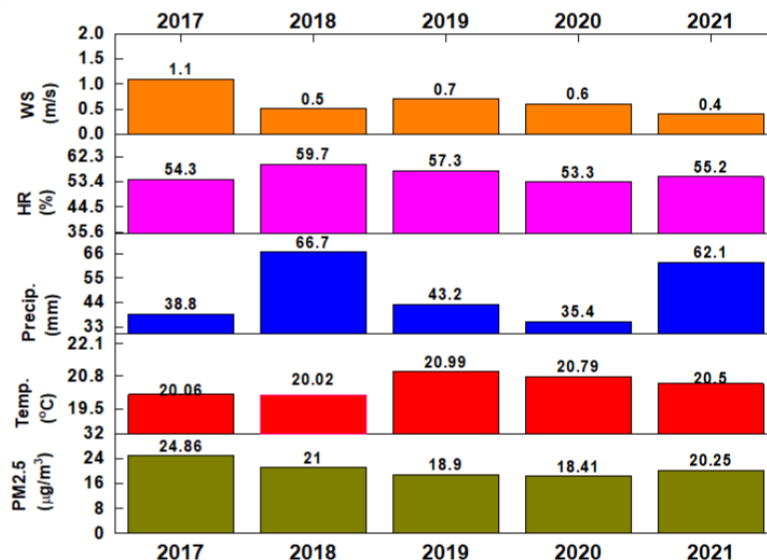


Figura 8. Promedios anuales de los parámetros meteorológicos del municipio de Celaya: temperatura, humedad relativa (HR), velocidad del viento (WS) y precipitación (PP), y la concentración PM2.5 en el periodo 2017-2021.

En la figura 9 se muestra la variación de los promedios mensuales de la concentración de PM2.5 y las variables meteorológicas. Como se puede ver, concentraciones máximas de PM2.5 se registran en el mes de mayo coincidiendo con temperaturas máximas y en el mes de diciembre con temperaturas mínimas. Esto se puede atribuir a que en el mes de diciembre se genera una estabilidad atmosférica y con ello la acumulación o poca dispersión de partículas. Sin embargo, en los meses de abril y mayo correspondientes a la primavera la vegetación sufre cambios y liberan partículas orgánicas como el polen, sumado a que en estas épocas previas a las lluvias se favorecen los incendios forestales o de pastizales. El factor de corrección mensual de la temperatura y la concentración de PM2.5 tiene un valor de -0.023 indicando una nula correlación entre estas variables.

En la figura 9 se observa que la época de lluvias se genera en los meses de junio a septiembre coincidiendo con los mínimos de concentración de PM2.5. Esto concuerda con lo publicado por otros autores que mencionan el efecto de arrastre de las partículas por las gotas de lluvia. El factor de correlación de estas dos variables tiene un valor de 0.272 indicando una correlación débil y directamente proporcional. Este factor no concuerda con lo ilustrado en la figura 11. De igual manera la humedad relativa presenta los máximos en los meses de julio a septiembre coincidiendo con el descenso de la concentración de PM2.5. El factor de correlación para estas dos variables es de -0.41 indicando una correlación inversamente proporcional moderada. Es decir que la concentración disminuye con el aumento de la HR. Finalmente, los máximos de la velocidad del viento se registran en los meses de marzo abril y los mínimos en agosto aproximadamente. En la figura 11 se observa que la concentración de PM2.5 disminuye cuando se registran máximos de la velocidad del viento. El factor de correlación de Pearson para estas dos variables es de -0.59 indicando una correlación moderada y de forma inversa, donde la concentración disminuye con el aumento de la velocidad del viento.

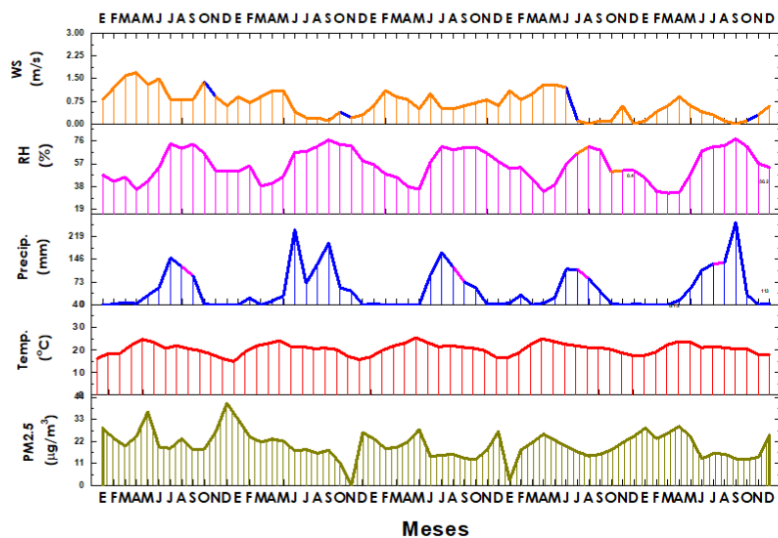


Figura 9. Variación de los promedios mensuales de los parámetros meteorológicos del municipio de Celaya: temperatura, humedad relativa (HR), velocidad del viento (WS) y precipitación (PP), y concentración PM2.5 en el periodo 2017-2021.

Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que los promedios anuales la concentración de PM_{2.5} de las ciudades analizadas rebasan el límite máximo permisible de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con excepción de San Miguel de Allende en el 2017. Además, el municipio que presenta los promedios anuales más bajos de concentración de PM_{2.5} es San Miguel de allende con 12.5 aproximadamente y las ciudades con mayor contaminación son las que se encuentran en el corredor industrial, Celaya, Salamanca e Irapuato.

La concentración de PM_{2.5} varía de acuerdo con las estaciones del año, donde se pudo observar que los meses con mayores concentraciones fueron mayo y diciembre. El mes de mayo concuerda con la temporada de sequía en el estado donde se registran máximos de temperatura, lluvias nulas, baja humedad relativa y vientos ligeros en todas las ciudades analizadas. En contraste, en diciembre correspondiente a la estación de invierno se registraron los mínimos de temperatura, escasas lluvias, alta humedad relativa y vientos ligeros, generando una atmosfera estable y con ello y posible estancamiento de partículas o mala dispersión de estas. En general durante todos los años, las mínimas concentraciones de PM_{2.5} se registraron en el mes de octubre coincidiendo con el fin de la temporada de lluvias, humedad relativa alta, temperatura media y velocidades de viento ligeros.

El análisis mensual de las variables meteorológicas y la concentración de PM_{2.5} permite visualizar con mayor detalle la relación que existe entre ellas. La precipitación, humedad relativa y velocidad del viento muestra un efecto inverso sobre la concentración de las PM_{2.5}. Sin embargo, la temperatura tiene una relación directa sobre la concentración de las PM_{2.5} en mayo y una relación inversa en mes de diciembre donde las temperaturas son mínimas. En general el factor de correlación para cada par de variables en relación con la concentración de PM_{2.5} dieron valores muy bajos, atribuyendo esto a que la variación de la concentración de PM_{2.5} depende de muchos factores y no solo del comportamiento de las variables meteorológicas, es decir, el flujo vehicular, la actividad agrícola, industrial, comercial y de servicio de cada ciudad, los incendios forestales o de pastizales pueden en gran medida modificar dichas concentraciones.

Referencias

- Adam, M. E. N. (2013). Suspended particulates concentration (PM10) under unstable atmospheric conditions over subtropical urban area (Qena, Egypt). *Advances in Meteorology*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/457181>
- Amador, J, González, V, Balderrama, J.P, Cerecedo, P, López, J, Rivera, I, Suárez, V. (2013). Efectos de las horas de sueño sobre el rendimiento escolar en alumnos de nivel superior. *Ciémel*, 5(1), 1–17.

- Anónimo. (2019). Análisis de la calidad del aire en cuanto a PM_{2.5} y datos meteorológicos: Calexico, California y Mexicali, Baja California. *California Air Resources Board*.
- Bhaskar, B. V., & Mehta, V. M. (2010). Atmospheric particulate pollutants and their relationship with meteorology in Ahmedabad. *Aerosol and Air Quality Research*, 10(4), 301–315. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2009.10.0069>
- Bhaskar, B. V., Mehta, V. M., Unal, Y. S., Toros, H., Deniz, A., Incecik, S., Campo, A. M., Fernández, M. E., Gentili, J. O., Pohjola, M. A., Kousa, A., Kukkonen, J., Härkönen, J., Karppinen, A., Aarnio, P., Koskentalo, T., Unal, Y. S., Toros, H., Deniz, A., & Incecik, S. (2011). Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5504–5513. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.039>
- Campo, A. M., Fernández, M. E., & Gentili, J. O. (2017). Variabilidad temporal del PM₁₀ en Bahía Blanca (Argentina) y su relación con variables climáticas. *Cuadernos Geográficos*, 56(3), 6–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v56i3.5084>
- Cichowicz, R., Wielgosiński, G., & Fetter, W. (2020). Efecto de la velocidad del viento sobre el nivel de concentración de partículas PM₁₀ en el aire atmosférico durante la temporada de invierno en las cercanías de una gran planta de combustión Robert. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 77(1–2), 1–14.
- DOF. (2014). NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. *Diario Oficial de La Federación*, 10–11. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014
- García, M. Á., Sánchez, M. L., de los Ríos, A., Pérez, I. A., Pardo, N., & Fernández-Duque, B. (2019). Analysis of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations in an Urban Atmosphere in Northern Spain. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76(2), 331–345. <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0581-3>
- Gómez Comba, C. A. (2017). *Contaminación del aire en medellin por pm10 y pm2.5 y sus efectos en la salud*.
- Pohjola, M. A., Kousa, A., Kukkonen, J., Härkönen, J., Karppinen, A., Aarnio, P., & Koskentalo, T. (2002). The Spatial and Temporal Variation of Measured Urban PM₁₀ and PM_{2.5} in the Helsinki Metropolitan Area. *Urban Air Quality — Recent Advances*, 189–201. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0312-4_14
- Tian, X., Cui, K., Sheu, H. L., Hsieh, Y. K., & Yu, F. (2021). Effects of rain and snow on the air quality index, PM_{2.5} levels, and dry deposition flux of PCDD/Fs. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(8). <https://doi.org/10.4209/aaqr.210158>
- Unal, Y. S., Toros, H., Deniz, A., & Incecik, S. (2011). Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5504–5513. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.039>
- Wang, J., & Ogawa, S. (2015). Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 9089–9101. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809089>
- Zalakeviciute, R., López-Villada, J., & Rybarczyk, Y. (2018). Contrasted effects of relative humidity and precipitation on urban PM_{2.5} pollution in high elevation urban areas. *Sustainability (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/su10062064>
- Zhou, Y., Yue, Y., Bai, Y., & Zhang, L. (2020). Effects of Rainfall on PM_{2.5} and PM₁₀ in the Middle Reaches of the Yangtze River. *Advances in Meteorology*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/2398146>