



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SENSOR DE BAJO COSTO PARA MEDIR LA CALIDAD DEL AIRE

**Santiago Durán, Erika Yulieth Aldana
Montero, Astrid del Socorro Altamar
Consuegra**

**Universidad Libre
Bogotá, Colombia**

Alfonso Santos Montero

**Federación Nacional de
Biocombustibles de Colombia
Bogotá, Colombia**

Resumen

La calidad del aire es un fenómeno local que afecta de manera adversa la salud de la población. En Colombia ciudades como Bogotá y Medellín presentan problemas de contaminación atmosférica principalmente debidas al material particulado generado por fuentes móviles y que genera enfermedades de tipo respiratorio y cardiovascular. Los sistemas de vigilancia de calidad del aire a través de equipos automáticos avalados por la Agencia de Protección Ambiental EPA, permiten determinar las concentraciones de dichos contaminantes, sin embargo, aún existen en Colombia poblaciones que no cuentan con esta tecnología que demanda altos costos. Por lo que recientemente la utilización de sensores de bajo costo ha permitido que la población en general pueda medir la contaminación generada y relacionarlo con los índices de calidad del aire para establecer acciones para el cuidado de su salud. Debido a que estos equipos utilizan diferentes principios para la medición de los contaminantes, es necesario su calibración para encontrar la tendencia en comparación con equipos que siguen procedimientos avalados. Este trabajo, utiliza un sensor Temtop M2000C para determinar la calidad del aire por PM 2.5 y PM10 en un sector de la Localidad de Fontibón en Bogotá D.C y se realizan mediciones que son comparadas con los datos arrojados por la estación de calidad del aire de Fontibón de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB. Se utilizó el coeficiente de Pearson para determinar la relación existente entre los datos de la concentración de PM2.5 y PM10 del sensor Temtop M2000C y los datos de la estación ubicada en el barrio Villemar de la localidad de Fontibón. Estos valores no representan el porcentaje de confiabilidad del sensor frente a los datos reales de la SDA, si no la asociación en que dicho porcentaje de confiabilidad se encuentra relacionado con los datos distritales. El 75 % de los días medidos arrojan una correlación mayor a 0.75 para ambas concentraciones, lo que indica una fuerte relación la cual es directamente proporcional con los

datos de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ tomados con el sensor y los datos oficiales. Se realizaron dos ecuaciones de calibración para el sensor, una para PM_{2.5} y una para PM₁₀, tomando como variable dependiente para cada una, el promedio diario de las concentraciones de cada contaminante obtenidos de la estación del distrito, y como variable independiente los promedios diarios del sensor. Los resultados obtenidos fueron aceptables y muestran la utilidad de este tipo de equipos para establecer la tendencia de la calidad del aire.

Palabras clave: material Particulado; sensor bajo costo; calidad del aire

Abstract

Air quality is a local phenomenon that adversely affects population's health. In Colombia, cities such as Bogotá and Medellín have air pollution problems mainly due to particulate material generated by mobile sources, causing respiratory and cardiovascular diseases. The air quality surveillance systems through automatic equipment endorsed by the Environmental Protection Agency EPA, allow to determine the concentrations of these pollutants. However, there are still populations in Colombia that do not have this technology due to its demands high costs. Therefore, recently the use of low-cost sensors has allowed the population to measure the pollution generated and relate it to air quality parameters to establish actions for their health care. Since these devices use different principles for measuring contaminants, their calibration is necessary to find the trend compared to devices that follow approved procedures. This work uses a Temtop M2000C sensor to determine the air quality by PM_{2.5} and PM₁₀ in a sector of the town of Fontibón in Bogotá DC and measurements are made that are compared with the data obtained by the Fontibón air quality station. of the Air Quality Monitoring Network of Bogotá RMCAB. The Pearson coefficient was used to determine the relationship between the PM_{2.5} and PM₁₀ concentration data from the Temtop M2000C sensor and the data from the station located in the Villemar neighborhood of the town of Fontibón. These values do not represent the percentage of reliability of the sensor compared to the real data of the SDA, but the association in which said percentage of reliability is related to the RMCAB data. 75% of the days measured show a correlation greater than 0.75 for both concentrations, which indicates a strong relationship which is directly proportional to the data on the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ taken with the sensor and the RMCAB data. Calibration equations were performed for the sensor, for PM_{2.5} and for PM₁₀, taking as a dependent variable for each one, the daily average of the concentrations of each pollutant obtained from the district station, and as an independent variable the daily averages of the sensor. The results obtained were acceptable and showed the usefulness of this type of equipment to establish the trend of air quality.

Keywords: particulate material; low cost sensor; air quality

1. Introducción

Actualmente la contaminación del aire es un problema que viene generando graves consecuencias sobre la salud de las personas, los animales y demás seres vivos, esta problemática es de tal magnitud que es considerado uno de los factores asociados a las muertes por afecciones



respiratorias (Altamar y Meneses, 2020). Un estudio reciente de la Carga Mundial de Enfermedades (GBD por sus siglas en inglés), que evaluó 79 factores de riesgo, informó que la exposición a la contaminación del aire del hogar y del ambiente en términos de partículas menores de 2.5 μm (PM2.5), se encontraba entre los 8 principales riesgos de GBD en 2015 para ambos sexos (Mazaheri et al., 2018).

Los niveles de contaminación causada por la alta exposición de material particulado han empezado a generar conciencia en países del medio oriente como China e India, países altamente contaminados debido a su gran actividad industrial. Lo anterior ha motivado la utilización de equipos y sensores accesibles a la población del común para monitorear de manera masiva contaminantes como el PM 2.5 (Liu, Zhang, Jiang, & Chen, 2017).

Los instrumentos tradicionales de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real son costosos en términos de instalación y mantenimiento; por lo tanto, estas redes de monitoreo existentes están escasamente desplegadas y carecen de densidad de medición para desarrollar mapas de contaminantes del aire espaciotemporales de alta resolución. (Munir, Mayfield, Coca, Jubb, & Osammar, 2019).

Sin embargo, la comunidad científica en diferentes estudios, cuestiona la eficiencia de estos sensores de bajo costo, afirma que varias compañías comerciales han empezado a sacar al mercados sensores de bajo costo (SBC), los cuales han sido analizados y comparados con estaciones meteorológicas por la comunidad científica, y sus estudios afirman que los SBC son inestables y frecuentemente son afectados por las condiciones atmosféricas, presentan sensibilidades cruzadas de los compuestos que interfieren y que pueden cambiar el rendimiento de los equipos dependiendo de la ubicación del sitio (Karagulian et al., 2019).

Los sensores de bajo costo, en caso tal que su uso sea eficiente, puede dar viabilidad a que la comunidad o incluso los mismos entes de control y gubernamentales puedan acceder a nuevos lugares del territorio nacional, complementando la información y posibilitando el diseño de nuevas metodologías y programas para la prevención y mitigación de la contaminación del aire (Franco, M. C. B et al., 2019).

Los avances recientes en las tecnologías de sensores de contaminación del aire podrían proporcionar información adicional sobre las fuentes cercanas, y podrían apoyar también, a la ubicación de las estaciones de monitoreo mejorando el conocimiento de la variación espaciotemporal de los contaminantes del aire y sus efectos asociados a la salud. (Feinberg et al., 2019). Lo anterior da fundamento a las recomendaciones de las autoridades ambientales bogotanas, que tratan sobre el uso de nuevas tecnologías que sean poco costosas, y alternativas, permitiendo nuevos puntos de vista, y teniendo en cuenta a los habitantes de la ciudad.

Por otra parte, es necesario calibrar y evaluar el rendimiento de los sensores de bajo costo para interpretar de manera correcta los resultados y reducir la confusión cuando las mediciones de estos equipos no están de acuerdo con las mediciones realizadas por equipos avalados por organismo internacionales. Son necesarios estudios sistemáticos de campo para realizar la comparación entre los sensores de bajo costo con aquellos de mayor tecnología para caracterizar el rendimiento del



sensor. (Feenstra et al., 2019). Mostrando así la importancia de la comparación y una posible regulación del uso de estos equipos aconsejados para el uso común fomentando la participación ciudadana.

En este estudio, se evalúa el desempeño de un sensor de bajo costo que utiliza métodos ópticos para determinar la concentración de PM 10 y PM 2.5 y se compara con equipos de referencia de la Estación de Calidad del Aire de Fontibón ubicada en el occidente de la ciudad de Bogotá D.C, se establecen las correlaciones entre las mediciones obtenidas por ambos equipos, generando una ecuación de calibración corregida por las influencias de la temperatura y humedad relativa en la zona.

2. Materiales y Métodos

Se realizaron mediciones de las concentraciones de material particulado utilizando un sensor Temtop M2000C, el cual también reporta datos concernientes a la temperatura y humedad relativa del ambiente con una periodicidad del orden de segundos. El sensor mide dos distribuciones de tamaño aerodinámicos: menores a 2.5 micrómetros (PM 2.5) y menores a 10 micrómetros (PM 10) empleando métodos ópticos, el funcionamiento se basa en el uso de un láser para la detección de las partículas, las cuales impiden el paso de la luz. El material particulado pasa por un contador óptico de partículas ubicado en el haz de luz y posteriormente al pasar por este lugar, la luz se dispersa, y se refleja a un espejo el cual está enfocado en un detector que convierte las variaciones de la intensidad de luz en una señal eléctrica. Los equipos de referencia ubicados en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) utilizan la técnica de medición de atenuación de rayos beta con mediciones horarias para la determinación de PM10 y PM 2.5.

El sensor Temtop M2000C fue ubicado a una altura de 1.5 m y una distancia de 7 m de la estación de calidad del aire Fontibón perteneciente a la RMCAB de la Secretaría Distrital de Ambiente y ubicado en el barrio Villemar de la Localidad de Fontibón, la cual es una zona urbana de bajo tráfico vehicular. Las tomas de datos con el sensor se realizaron durante 32 días, durante los meses de diciembre 2020 y enero de 2021, en la franja horaria entre las 9 y 13 horas, durante cada minuto. Es decir, se tomaron 240 datos diarios, los cuales se compararon de manera horaria, diaria y mensual con aquellas mediciones arrojadas por los equipos de referencia de la RMCAB en el mismo periodo de tiempo. El análisis estadístico de los datos se llevó a cabo utilizando los complementos de Excel integrado con software libre (Real Statistics).

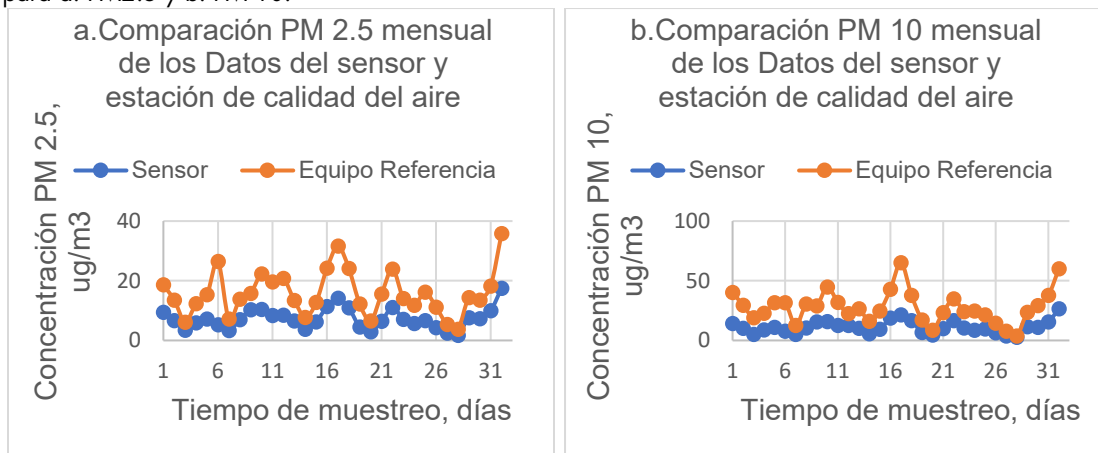
3. Resultados y análisis de resultados

En las Figuras 1a y 1b se muestran los datos mensuales de la concentración de PM 2.5 y PM 10 en el periodo de estudio. Estos datos representan el promedio de las mediciones tomadas cada día en la misma franja horaria. Se observa que para las dos concentraciones, las tendencias son similares y la información arrojada por el sensor es siempre inferior a aquella suministrada por los equipos de referencia a condiciones estándar. En general para los sensores de bajo costo, las diferencias en las mediciones de calidad del aire en comparación con equipos de referencia se



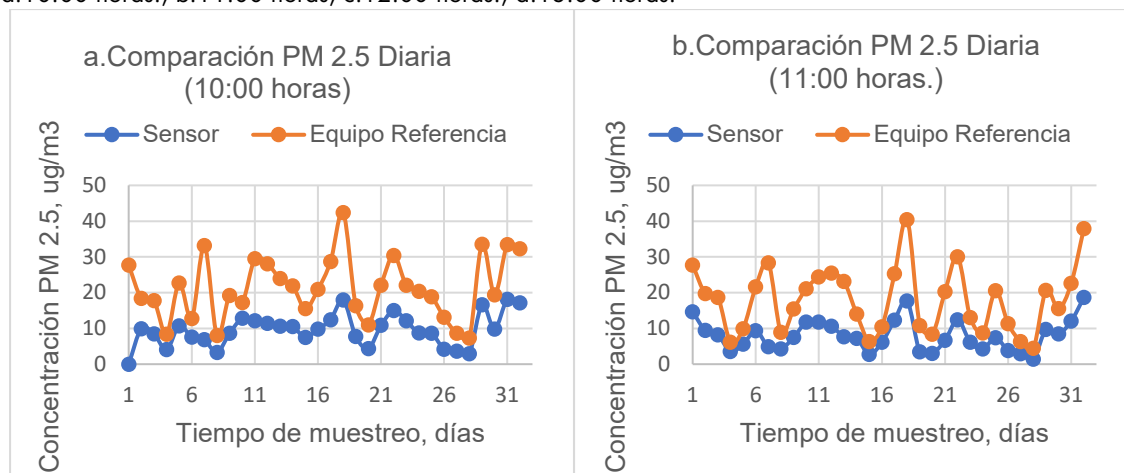
atribuyen a que no se cuenta con protocolos de calibración y operación estandarizados además de la influencia de variables como la temperatura o humedad que en ciertos casos son limitantes en la operación de los equipos de bajo costo. Sin embargo, se observa que a menores concentraciones de material particulado medida por los equipos de referencia la diferencia es menor.

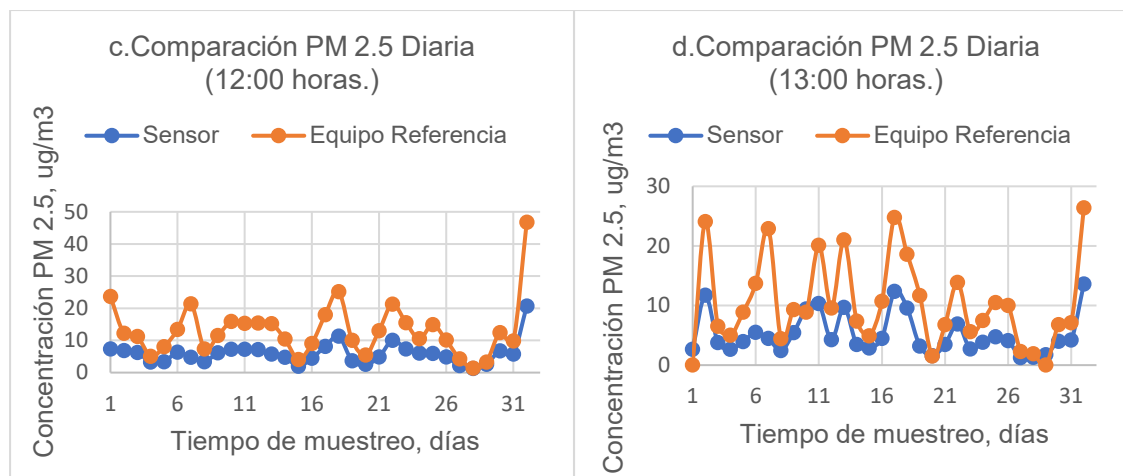
Figura 1. Comparación de la Concentración mensual de material particulado medidos por el equipo de referencia y el sensor para a. PM2.5 y b. PM 10.



En las Figuras 2a, 2b, 2c y 2d se muestra el análisis de los datos diarios de concentraciones de PM 2.5 comparados a la misma hora, confirmandose así, la misma tendencia que con los datos mensuales, es decir que con el promedio de los datos diarios el comportamiento del sensor siempre se encuentra por debajo del valor de referencia. Iguaes resultados se obtuvieron en el análisis diario de la concentración de PM 10.

Figura 2. Comparación de la Concentración diaria de PM 2.5 medidos por el equipo de referencia y el sensor para a. 10:00 horas.; b. 11:00 horas.; c. 12:00 horas.; d. 13:00 horas.





Para determinar la asociación entre estas dos variables cuantitativas (concentración obtenida por el sensor de bajo costo y obtenida por el equipo de referencia) se realizó un estudio basado en el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, el cual mide la relación con una línea recta. Para la evaluación del supuesto de normalidad se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk, aplicable para menos de 50 datos y en la cual se plantea en la hipótesis nula que la muestra proviene de una distribución normal y con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis alterna establece que la distribución no es normal.

Teniendo en cuenta lo anterior y utilizando la herramienta de análisis estadístico en Excel se calcularon los estadísticos p para cada conjunto de datos (concentración PM 2.5 sensor, Concentración PM 2.5 Estación, Concentración PM 10 sensor, Concentración PM 10 Estación, Humedad Relativa y Temperatura) tanto diarios como mensuales, en la totalidad de los casos los p-valor fueron mayores al nivel de significancia escogido ($\alpha = 0.05$) por lo tanto no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula y los datos presentan una distribución gaussiana. Lo anterior cumple con el supuesto para calcular los coeficientes de Pearson a cada conjunto de datos. En la Tabla 1 se muestran los valores para los datos mensuales.

Tabla 1. Prueba de Shapiro Wilk para las concentraciones PM 10, PM2.5, Humedad y Temperatura

	PM2,5		PM10		HUMEDAD	TEMPERATURA
	SENSOR	ESTACIÓN	SENSOR	ESTACIÓN	ESTACION	ESTACION
p- valor	0.15884059	0.17313939	0.15777726	0.15466846	0.0777773	0.517939575

Así mismo se realizó la estadística descriptiva para las variables estudiadas en el análisis mensual, lo cual se muestra en la Tabla 2 y se observa que el promedio de las mediciones para las concentraciones tanto de PM 2.5 como de PM 10 no superaron la normatividad colombiana sobre calidad del aire Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, es decir estuvieron por debajo de $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM 2.5 y PM 10 respectivamente.



Tabla 2. Estadísticos descriptivos para Concentración PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y Concentración PM 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

	PM2,5		PM10	
	SENSOR	ESTACIÓN	SENSOR	ESTACIÓN
MEDIA	7.304947917	15.8859375	11.0840299	27.7760417
ERROR ESTÁNDAR	0.614019775	1.32372929	0.94311024	2.39167123
MEDIANA	6.8125	14.2	10.2789583	25.5125
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	3.473420374	7.48814369	5.33503718	13.5293355
VARIANZA	12.0646491	56.0722959	28.4626218	183.04292
MAXIMO	17.51666667	35.85	26.5920833	65.1
MINIMO	1.7325	3.75	2.62	3.625

Para determinar la asociación entre las concentraciones de PM 2.5 y PM 10 medidas con el sensor y la Estación de calidad del aire, se calcularon los coeficientes de Pearson tanto para los datos diarios como mensuales y se observa salvo muy pocas excepciones que los valores están por encima de 0.798 para PM 2.5 indicando que existe una correlación positiva alta como mínimo entre las dos variables antes mencionadas y en todos los casos las concentraciones medidas por el sensor y la estación de referencia son directamente proporcionales. También se obtuvieron coeficientes de Pearson por encima de 0.52 para PM 10 lo que indica una correlación positiva moderada como mínimo para este caso. Para los datos mensuales de las dos concentraciones presentan correlaciones positivas muy altas, lo que indica la concordancia de los datos de las dos mediciones. Lo anterior se muestra en las Tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3. Coeficiente de Pearson para las concentraciones diarias de PM 2.5

Días de muestreo	Coeficiente de Pearson	Días de muestreo	Coeficiente de Pearson
1	0.986864722	17	0.92927903
2	0.979045772	18	0.99634664
3	0.982331013	19	0.94587124
4	0.884544802	20	0.97337159
5	0.984907591	21	0.8850073
6	0.814085701	22	0.95730812
7	0.860754768	23	0.9908492
8	0.927556877	24	0.96847057
9	0.999896079	25	0.88931834
10	0.452433455	26	-0.31662709
11	0.929300562	27	0.99619049
12	0.996690997	28	0.90864293
13	0.797840585	29	0.99673124
14	0.994913209	30	0.99681604
15	0.990842706	31	0.99963429
16	0.958137974	32	0.96831227



Tabla 4. Coeficiente de Pearson para las concentraciones diarias de PM 10

Días de muestreo	Coeficiente de Pearson	Días de muestreo	Coeficiente de Pearson
1	0.55821498	17	0.98366637
2	0.89729857	18	0.99885201
3	0.18315302	19	0.84462308
4	0.97667148	20	0.9755017
5	0.50660006	21	0.96327618
6	0.94275655	22	0.98834548
7	-0.65342041	23	0.99623134
8	0.63167052	24	0.98928067
9	0.52098227	25	0.98510865
10	0.75588879	26	0.91215007
11	0.87049823	27	0.90594788
12	0.9919071	28	0.99732418
13	0.98072646	29	0.98172777
14	0.97706099	30	0.99416697
15	0.92046362	31	0.83733379
16	0.81864524	32	0.96831227

Tabla 5. Coeficientes de Pearson para los datos mensuales de PM 10 y PM2.5

Coeficiente de Pearson	
PM 2.5	PM 10
0.90444094	0.92836784

Los anteriores resultados muestran que los datos de calidad del aire medidos por el sensor en evaluación, aunque se encuentran por debajo de las concentraciones medidas en la estación de referencia, si guardan una correlación alta y son útiles para establecer las tendencias en las variaciones de las concentraciones de material particulado.

Se aplicó un modelo de regresión múltiple a los datos obtenidos en el periodo de estudio y se hicieron correcciones por efecto de humedad relativa y temperatura, las ecuaciones de calibración obtenidas se muestran en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6. Ecuación de calibración para PM 2.5

Variables	Coeficientes
Intercepción en y	-3,224875581
PM2.5 del sensor	1,99275343
Humedad relativa	0,102948781
Temperatura	-0,007978051
R ²	0.8295
Ecuación: $Y=1,992PM2,5(S)+0,1029HR-0,0079T-3,225$	
Y= Concentración Equipo de referencia $\mu g/m^3$; S= Concentración Sensor $\mu g/m^3$; HR = Humedad Relativa %; T= Temperatura $^{\circ}C$	



Tabla 7. Ecuación de calibración para PM 10

Variables	Coeficientes
Intercepción en y	2,89695167
PM2.5 del sensor	2,312280382
Humedad relativa	-0,106761423
Temperatura	0,218975509
R ²	0.8675
Ecuación: $Y=2,312PM2,5(S)-0,1067HR+0,2189T+2,897$	
Y= Concentración Equipo de referencia $\mu g/m^3$; S= Concentración Sensor $\mu g/m^3$; HR = Humedad Relativa %; T= Temperatura $^{\circ}C$	

Los resultados obtenidos al utilizar las ecuaciones de calibración para generar los datos del equipo de referencia a partir de las concentraciones dadas por el sensor corregidos por temperatura y humedad relativa muestran valores de R² de 0.8295 y 0.8675 para PM 2.5 y PM 10 respectivamente, lo anterior muestra el buen grado de ajuste que existe entre los datos arrojados por el modelo y las concentraciones de material particulado medidas en el equipo de referencia. Teniendo en cuenta lo anterior, el sensor de bajo costo utilizado en las condiciones de este estudio representa una alternativa para establecer la tendencia de la concentración de material particulado. Sin embargo la literatura (Joshua Apte 2020) establece que las diferencias entre los sensores de bajo costo pueden tener resultados precisos pero también es necesario determinar si algunos otros factores hacen que dichos resultados puedan variar, ya que la temporada (invierno o verano) influye en que los resultados se encuentren por encima o por debajo de los equipos de referencia con que se calibra y cuyo método de medición está avalado por patrones internacionales. El estudio realizado en esta investigación se realizó en temporada seca y coincide con los resultados de Apte, 2020 en los cuales los datos de concentración de material particulado fueron subestimados es decir menores que los arrojados por el equipo de referencia.

4. Conclusiones

- Teniendo en cuenta que el principio de medición del equipo de referencia de la Estación de Calidad del Aire Fontibón presenta mayores ventajas en cuanto a su tecnología y validez y a su vez muy diferente a los principios que posee el sensor Temtop M2000C, en la totalidad de los casos expuestos en este estudio el equipo de bajo costo tiene una tendencia similar en su comportamiento frente a la estación. Las concentraciones medidas por el equipo de bajo costo, siempre estuvieron por debajo a la publicadas por la RMCAB, estando más cercas de los valores oficiales los días que presentaron bajas concentraciones de los contaminantes PM10 y PM2.5.
- Al relacionar los datos del sensor Temtop M2000C con el equipo de referencia de la estación para la medición de la calidad del aire de Fontibón, se evidencia por medio del coeficiente de Pearson y los análisis estadísticos aplicados en la investigación, que, en la gran mayoría de los casos estudiados, existe una relación directamente proporcional entre los equipos. Estas correlaciones al estudiarlas día a día durante el periodo de 4 horas escogido arrojaron valores en su gran mayoría por encima de 0.75 para el coeficiente de Pearson tanto para PM2.5 como para PM10. Sin embargo, al realizar el análisis de manera mensual los valores del coeficiente de



Pearson se elevaron a 0.9 para ambos contaminantes, demostrando que la tendencia mensual ofrece una correlación más fuerte con los datos del equipo de referencia.

- Se muestra por medio de las ecuaciones de calibración del sensor Temtop M2000C para PM_{2.5} y PM₁₀, las cuales involucraron como variables independientes la Humedad relativa y la Temperatura, que la concentración de los contaminantes poseen una relación relativamente alta con dichas variables, ya que al aplicar dichas ecuaciones se obtiene un buen ajuste de los datos, y también al calcular y comparar los índices de calidad de aire locales y nacionales muestran gran similitud con los valores que los promedios de los datos de la estación arrojan para cada uno de los contaminantes.
- En el período muestreado se cumplieron los límites de calidad del aire dados por la normatividad actual Resolución 2254 de 2017, ya que estuvieron por debajo de 37.5 µg/m³ para PM 2.5 y 75 µg/m³ para PM₁₀.

5. Referencias

Artículos de revistas

- Feenstra, B., Papapostolou, V., Hasheminassab, S., Zhang, H., Boghossian, B. Der, Cocker, D., & Polidori, A. (2019). Performance evaluation of twelve low-cost PM_{2.5} sensors at an ambient air monitoring site. *Atmospheric Environment*, Vol. 216, No, 21, 116946.
- Feinberg, S. N., Williams, R., Hagler, G., Low, J., Smith, L., Brown, R., Campbell, J. (2019). Examining spatiotemporal variability of urban particulate matter and application of high-time resolution data from a network of low-cost air pollution sensors. *Atmospheric Environment*, Vol. 213, No 18, pp 579–584.
- Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, Vol 10, No 9, 506.
- Liu, D., Zhang, Q., Jiang, J., & Chen, D. R. (2017). Performance calibration of low-cost and portable particular matter (PM) sensors. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 112, pp. 1–10.
- Mazaheri, M., Clifford, S., Yeganeh, B., Viana, M., Rizza, V., Flament, R., ... Morawska, L. (2018). Investigations into factors affecting personal exposure to particles in urban microenvironments using low-cost sensors. *Environment International*, Vol. 120, pp. 496–504.
- Munir, S., Mayfield, M., Coca, D., Jubb, S. A., & Osammor, O. (2019). Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—a case study in Sheffield. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 191, No 2.

Libros

- Altamar, A; Meneses, S. (2020). Aporte a la medición de dosis respirable de material particulado de Biciusuarios en Bogotá. *Desarrollo sostenible Casos y Aplicaciones en el contexto colombiano*. Ediciones EAN, Bogotá D.C., pp 254.

Fuentes electrónicas

- Belalcázar, M.; García P. (2019, diciembre). Proyecto de Grado: Universidad Autónoma de Occidente. Consultado el 10 de junio de 2021 en



<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11969/T08999.pdf;jsessionid=0D52435505E39F9B18F950DCDB1724B9?sequence=3>.

- Apte, J. University of California Berkeley (2020, December). State of Play of Low-Cost Sensors for Monitoring PM2.5. Consultado el 30 de mayo de 2020 en <https://www.edf.org/sites/default/files/documents/State-of-Play-Low-Cost-Sensors-Monitoring-PM2.5-India.pdf>.

Sobre los autores

- **Santiago Durán, Erika:** Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre Sede Bogotá. santiago-duranc@unilibre.edu.co.
- **Yulieth Aldana Montero:** Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre Sede Bogotá. erikay-aldanam@unilibre.edu.co.
- **Astrid del Socorro Altamar Consuegra:** Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería Química, Doctor en Ingeniería Química de la Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil. Profesor Jornada completa Universidad Libre sede Bogotá. astridd.altamarc@unilibre.edu.co.
- **Alfonso Santos Montero:** Ingeniero Metalúrgico, Universidad Libre. Secretario Tesorero y Concejero de Relaciones exteriores de La Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. alfonso.santos@fedebiocombustibles.com.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

