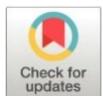


Evaluación temporal del material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en el Distrito Metropolitano de Quito – Ecuador

Temporary assessment of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter in the Metropolitan District of Quito – Ecuador

- ¹ Franz Patricio Verdezoto Mendoza  <https://orcid.org/0000-0002-0049-005X>
Universidad Estatal de Bolívar (UEB), Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, Guaranda-Ecuador
fverdezoto@ueb.edu.ec
- ² Juan Carlos Muyulema Allaica  <https://orcid.org/0000-0002-9663-8935>
Universidad Estatal Península de Santa Elena, Centro de Investigación e Innovación de Ingeniería Industrial, La Libertad, Ecuador.
jmuyulema@upse.edu.ec
- ³ Héctor Ricardo Cuba Torre  <https://orcid.org/0000-0002-9011-0363>
Universidad Nacional del Callao (UNAC), Facultad de Ingeniería Química, Lima, Perú
hrcubat@unac.edu.pe
- ⁴ Anita Karina Serrano Castro  <https://orcid.org/0000-0002-0347-1823>
Universidad Estatal de Bolívar, Facultad de Ciencias de la Salud y del Ser Humano, Guaranda-Ecuador.
aserrano@ueb.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 08/08/2022

Revisado: 23/09/2022

Aceptado: 24/10/2022

Publicado: 15/11/2022

DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i4.1.2393>

Cítese: Verdezoto Mendoza, F. P., Muyulema Allaica, J. C., Cuba Torre, H. R., & Serrano Castro, A. K. (2022). Evaluación temporal del material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en el Distrito Metropolitano de Quito – Ecuador. *ConcienciaDigital*, 5(4.1), 21-44. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i4.1.2393>



CONCIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://concienciadigital.org>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Palabras

claves: PM_{2.5};
PM₁₀; Calidad
del Aire,
Correlación,
Meteorológicas.

Keywords:

PM_{2.5}; PM₁₀;
Air Quality;
Correlation;
Meteorological.

Resumen

Introducción. El material particulado se constituye en uno de los criterios más trascendentales al momento de evaluar la contaminación del aire, debido a la gran diversidad de fuentes que lo pueden producir y a los efectos que tiene sobre la salud. **Objetivo.** El presente estudio tuvo por objetivo evaluar el material particulado PM_{2.5} y PM₁₀, en la temporalidad horario, mensual, estacional y anual y la correlación con las variables meteorológicas en la zona del Distrito Metropolitano de Quito-Ecuador, en el periodo 2013-2020. **Metodología.** La base de datos y variables meteorológicas se obtuvieron de dos estaciones de monitoreo, Belisario y Carapungo, que están distribuidas en la zona de estudio. Se realizó un análisis exploratorio y correlación simple para 65718 datos de PM_{2.5} en Belisario, 66191 datos para PM_{2.5} en Carapungo y 61152 datos de PM₁₀ en Carapungo. **Resultados.** Los resultados evidencian que la estación de Carapungo presenta mayor concentración de material particulado respecto a la estación Belisario. La relación PM_{2.5}/PM₁₀ de la estación Carapungo es de 0.41 de material fino anisotrópico, que comparados con algunas ciudades como Perú, Colombia, México y Chile es similar. Respecto a las correlaciones el PM_{2.5} y PM₁₀ presentan una correlación significativa con la temperatura, humedad relativa, dirección del viento y precipitación, pero difieren en las dos estaciones. **Conclusiones.** Se concluye que el material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en el área analizada no depende de factores climáticos, sino más bien, puede deberse a la topografía específica de la zona la cual se encuentra caracterizada por estar rodeada de bosques, volcanes y montañas.

Abstract

Introduction. Particulate matter is one of the most transcendental criteria when evaluating air pollution, due to the great diversity of sources that can produce it and the effects it has on health. **Objective.** The objective of this study was to evaluate PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter in the hourly, monthly, seasonal, and annual time periods and the correlation with meteorological variables in the area of the Metropolitan District of Quito-Ecuador, in the period 2013-2020. **Methodology.** The database and meteorological variables were obtained from two monitoring stations, Belisario and

Carapungo, which are distributed in the study area. An exploratory analysis and simple correlation were performed for 65718 PM_{2.5} data at Belisario, 66191 data for PM_{2.5} at Carapungo and 61152 PM₁₀ data at Carapungo. **Results.** The results show that the Carapungo station has a higher concentration of particulate matter than the Belisario station. The PM_{2.5}/PM₁₀ ratio of the Carapungo station is 0.41 of anisotropic fine material, which compared to some cities such as Peru, Colombia, Mexico and Chile is similar. Regarding correlations, PM_{2.5} and PM₁₀ present a significant correlation with temperature, relative humidity, wind direction and precipitation, but they differ in the two stations. **Conclusions.** It is concluded that PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter in the area analyzed does not depend on climatic factors, but rather, it may be due to the specific topography of the area, which is characterized by being surrounded by forests, volcanoes, and mountains.

Introducción

El término material particulado (PM, del inglés *Particulate Matter*), se refiere a partículas discretas (gotas de líquido o sólido), la contaminación por partículas incluye dos grupos principales: PM₁₀ (fracción inhalable o gruesa) las cuales tienen un tamaño mayor a 2.5 y menor a 10 micrómetros (μm) y PM_{2.5} (fracción torácica o fina) que son partículas de diámetro menor o igual a 2.5 μm (Legarreta et al., 2015; Ryu et al., 2021).

El material particulado que contiene el aire urbano es una mezcla compleja de componentes químicos y biológicos de múltiples fuentes, que incluyen el hollín, metales pesados y de transición, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), polen y componentes bacterianos (He et al., 2022). Varios estudios han demostrado que la composición de las partículas y sus efectos toxicológicos sobre la salud varían según el tiempo, la ubicación, el tamaño de partícula y el origen de las partículas (Rönkkö et al., 2020; Veld et al., 2022; Wu et al., 2022).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 92% de las personas en todo el mundo vive en lugares con mala calidad del aire exterior, donde los principales factores de riesgo para desarrollar enfermedades respiratorias crónicas (ERC) están relacionados con el clima y el medio ambiente (Barry & Annesi-Maesano, 2017). Conjuntamente, reportó para el 2016, un valor de 4,2 millones de muertes que fueron causadas por la contaminación ambiental del aire en todo el mundo. Se estima que causa aproximadamente el 29% de las muertes por cáncer de pulmón, el 24% de las muertes

por accidente cerebrovascular, el 25% de las muertes por enfermedades cardíacas y el 43% de otras enfermedades pulmonares. Además, la contaminación del aire se ha atribuido al 26% de las muertes por infecciones respiratorias, el 25% de las muertes por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y aproximadamente el 17% de las enfermedades cardíacas isquémicas y los accidentes cerebrovasculares (Khomsi et al., 2021). En Ecuador la exposición a la contaminación atmosférica representa un estimado de 2700 muertes prematuras en el año 2018 y un costo de 1000 millones de dólares para ese mismo año (Alvarez-Mendoza et al., 2020; Cornejo-Vásconez et al., 2022).

Referente al material particulado, este contaminante presenta los mayores factores de riesgo para la salud humana mundial y se asocia con una mayor morbilidad y mortalidad debido a un conjunto diverso de efectos perjudiciales para la salud que incluyen enfermedades cardiovasculares, accidente cerebrovascular, Alzheimer y asma (Rönkkö et al., 2020).

La calidad del aire de un área determinada depende de las fuentes de emisiones de los contaminantes y de las condiciones meteorológicas regionales (Valencia et al., 2020), estos últimos pueden afectar los procesos físicos y las reacciones químicas de los contaminantes, por ejemplo, la velocidad y dirección del viento pueden afectar la difusión y transmisión de contaminantes mientras que la temperatura y la humedad pueden afectar los procesos de reacción de contaminantes (Jiaxin et al., 2021).

Según reporte del informe emitido por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) para el año 2018, el material particulado PM_{10} sobrepasa la Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire (NECA) en la mayoría de las estaciones de monitoreo y el $PM_{2.5}$ sobrepasa en todas las estaciones monitoreadas (Rodríguez-Guerra & Cuvi, 2019).

Tomando en consideración que el material particulado es una variable muy importante por sus niveles de concentración y efectos en la salud de la población del DMQ, el presente estudio tiene como objetivo principal, evaluar la variación temporal del PM_{10} y $PM_{2.5}$ y su relación con las variables meteorológicas en la Zona del Distrito Metropolitano de Quito – Ecuador durante los años 2013-2020.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó entre 2013 y 2020 en el DMQ, provincia de Pichincha, Ecuador, ubicada geográficamente en la Latitud $0^{\circ} 13' 07''$ S y Longitud $78^{\circ}30'35''$ O a 2800 msnm. Quito presenta una topografía compleja con temperatura y humedad relativa media de $13.5^{\circ}C$ y 82%, respectivamente.

La calidad del aire del DMQ, es monitoreado por La Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), cuya localización de las estaciones cumplen con las

recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) (EPA. 40CFR58, Apéndice E) y de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, No. 8), además cuenta con información validada mediante respaldo procedimental y documental, desde enero de 2004 (IAMQ, 2018).

Los datos del material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ y las variables meteorológicas se obtuvieron de dos estaciones de monitoreo, Belisario y Carapungo que están distribuidos en el DMQ se incorporan en la Figura 1 y su ubicación Tabla 1, las cuales forman parte de la Red Automática (RAUTO) del subsistema de la REMMAQ de la secretaria de Ambiente del Ecuador.

Figura 1

Ubicación espacial de las estaciones de calidad de aire de Carapungo y Belisario

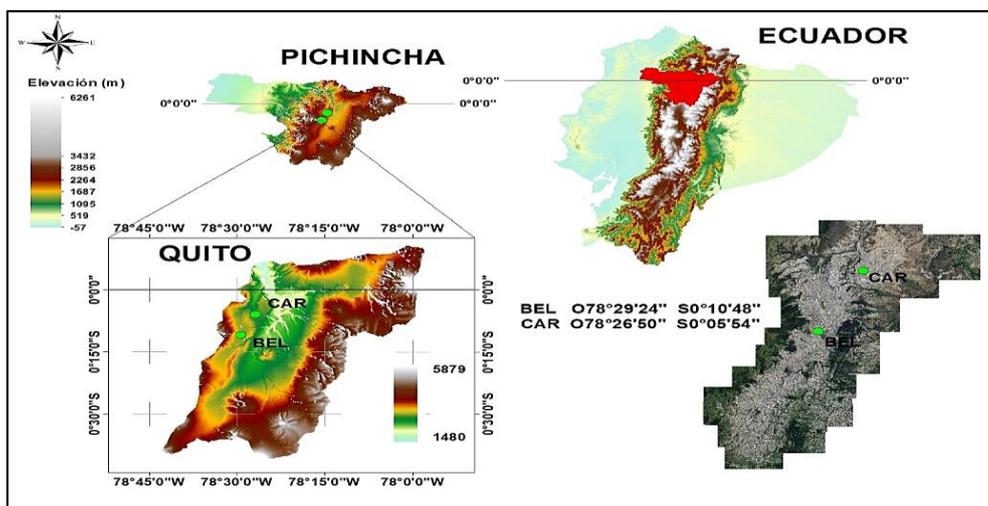


Tabla 1

Características generales de las estaciones de Carapungo y Belisario

Estaciones	Código	Altura (msnm)	Ubicación	Sitio*
Belisario	BEL	2835	Terraza del Edificio Administrativo del Colegio San Gabriel (Av. América 3541)	UB-R
Carapungo	CAR	2660	Super manzana B, el Verjel S/N, edificio Andinatel.	UB-C

*Categoría del sitio: UB-Urbano, C- Comercial, R-Residencial.

Los métodos y equipos con la cual se registraron las concentraciones de PM₁₀, PM_{2.5} y datos meteorológicos se muestra en la Tabla 2, los cuales son parte de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) del subsistema Red Automática (RAUTO) de la Secretaría del Ambiente del Ecuador.

Tabla 2

Características de los parámetros evaluados en Carapungo y Belisario

Estaciones	PM ₁₀ y PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	Temperatura Humedad	Precipitación	Dirección del viento
	Método de medida	Marca y Modelo		Equipo
Belisario y Carapungo	Atenuación de rayos beta (Método equivalente para PM10 EPA No. EQPM-1102-150)	Thermo Scientific/FH62 C14	Thermo Andersen/FH62 C14	Sensor Pt100 y sensor capacitivo para HR / Clase II	Báscula oscilante / Clase II	Veleta y potenciómetro con señal de voltaje proporcional a la dirección de viento / Clase II.

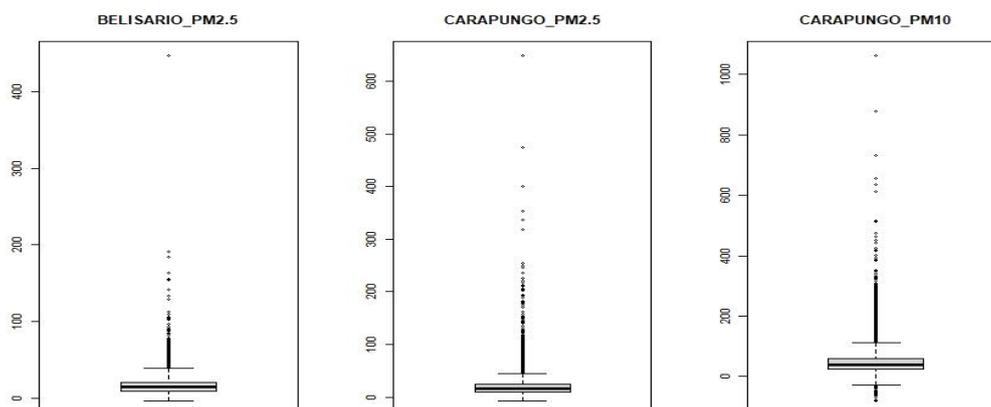
Resultados y Discusión

Evaluación de los datos

Se realizó un análisis exploratorio para 65718 datos de PM_{2.5} en Belisario, 66191 datos para PM_{2.5} en Carapungo y 61152 datos de PM₁₀ en Carapungo. La **Figura 2** presenta el diagrama de cajas para material particulado de las dos estaciones analizadas en las que se puede observar de datos fuera de lugar o valores atípicos, razón por la cual sus desviaciones estándar respecto a la media son valores altos, con valores 10,07 para PM_{2.5} en la estación Belisario, 13.72 para PM_{2.5} en la estación Carapungo y 34,42 para PM₁₀ de la estación Carapungo. La mayor cantidad de valores están muy cerca de la media representado por la anchura de la caja entre el primer y tercer cuartil. Los bigotes presentan una mayor variabilidad de los datos en el cuartil superior para todos los conjuntos de datos, con máximos de 447,11 µg/cm³ para PM_{2.5} de la estación Belisario, 648,38 µg/cm³ para PM_{2.5} de la estación Carapungo y 1061,75 µg/cm³ para PM₁₀ de la estación Carapungo, que puede deberse a eventos extraordinarios durante el periodo evaluado.

Figura 2

Diagrama de cajas para los datos de las estaciones de Calidad del Aire Belisario y Carapungo en PM_{2.5} y PM₁₀



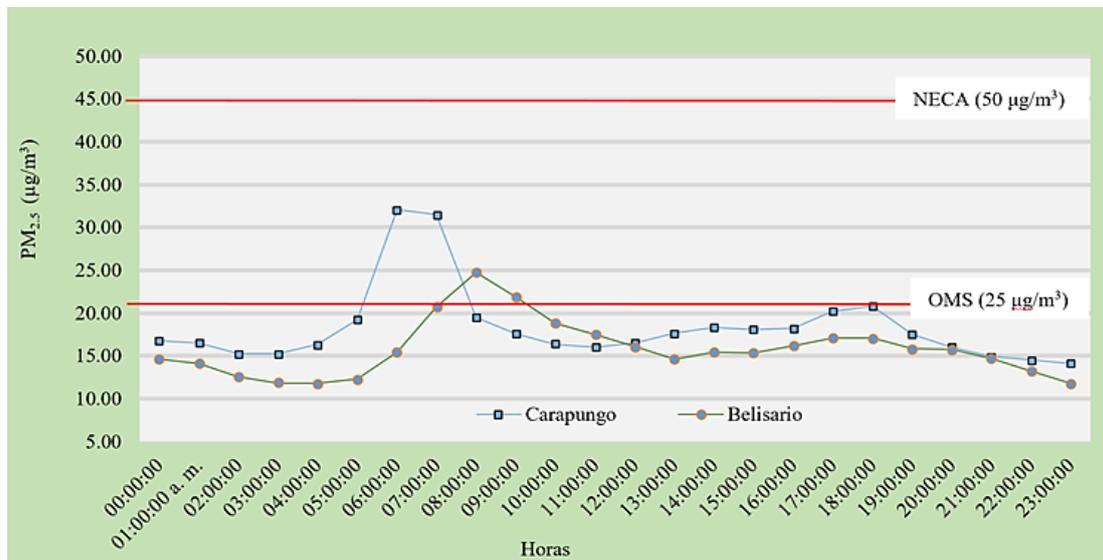
Variación horaria de PM2.5 para Belisario y Carapungo

En la **Figura 3** se observa el comportamiento del promedio horario multianual del PM2.5. Se evidencia comportamientos semejantes de las concentraciones durante las 24 horas, registrándose valores máximos de 32.1 (06:00 horas) y 24.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8:00 horas) y mínimas de 14.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (23:00 horas) y 11.78 (23:00 horas) para las estaciones de Belisario y Carapungo respectivamente, ambos asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas. Estos resultados son coherentes con los estudios realizados por De Jesús et al. (2019) y Pacsi (2016), del mismo modo se verifica que la estación de Carapungo presento mayor concentración, superando a los valores obtenidos en Belisario durante las 24 horas este comportamiento puede estar determinado por fuentes locales de combustión, el mismo que es coherente con los encontrados por De Jesús.

Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario para PM_{2.5} (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se observa que la estación de Belisario no supera la concentración establecida por dicha norma durante las 24 horas, a diferencia de la estación de Carapungo que supera este valor desde las 6:00 hasta las 7:00 horas. Sin embargo, al comparar con la NECA Diario para PM_{2.5} (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se evidencia durante las 24 horas que dichos valores no superan la concentración establecida para ambas estaciones.

Figura 3

Variación horaria multianual de PM_{2.5} entre Belisario y Carapungo



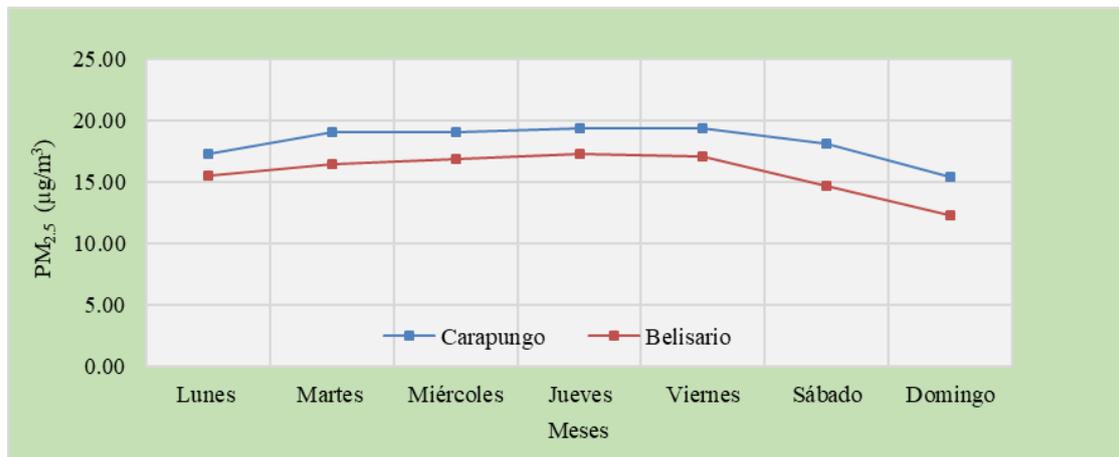
Variación diaria de PM_{2.5} para Belisario y Carapungo

En la **Figura 4** se muestra la variación promedio diaria para el periodo 2013-2020. Se puede apreciar que la estación de Carapungo presenta una mayor concentración de contaminantes durante todos los días de la semana en comparación con la estación de Belisario. Por otro lado, los días de mayor concentración con características similares se registró el martes miércoles y jueves, cuyas concentraciones fueron bajando paulatinamente lunes y sábado hasta llegar a las concentraciones mínimas registradas el domingo, comportamientos semejantes para las 2 estaciones.

Para ambas estaciones los mínimos valores se registran el domingo, y los máximos miércoles y jueves, estando estrechamente relacionado con los hábitos de la población, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular. Similares resultados fueron obtenidos por estudios realizados por Pacsi.

Figura 4

Variación diaria multianual de PM_{2.5} entre Belisario y Carapungo

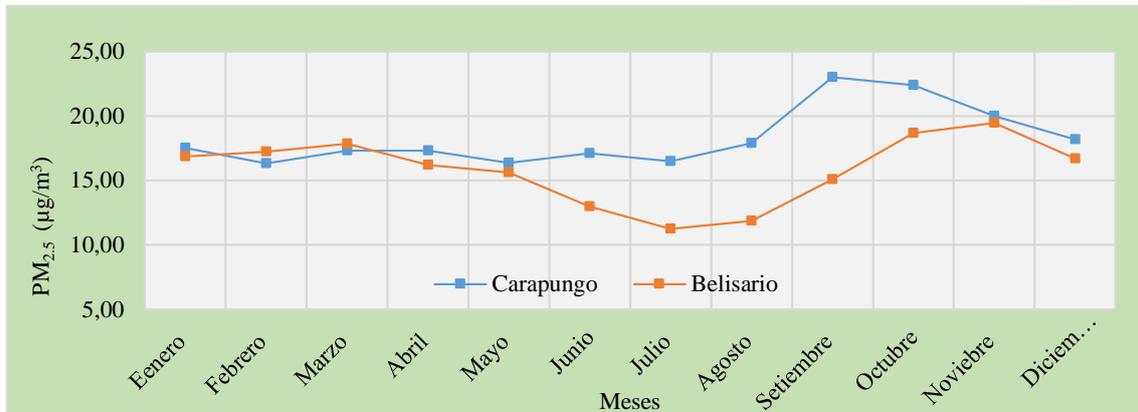


Variación mensual de PM_{2.5} para Belisario y Carapungo

En la **Figura 5** se puede observar que en los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo las dos estaciones no presentaron diferencias respecto a las concentraciones registradas, a partir de este mes las concentraciones se incrementaron en la estación de Carapungo hasta llegar a sus valores máximos en el mes de setiembre de 23.03 µg/m³, sin embargo la estación de Belisario presento un comportamiento opuesto cuyos valores disminuyeron hasta concentraciones mínimas de 11.23 µg/m³ en el mes de julio, para que a partir de allí se incrementara hasta valores picos en el mes de noviembre de 19.45 µg/m³.

Figura 5

Variación mensual multianual de PM_{2.5} entre Belisario y Carapungo



En tal sentido Pacsi (2016), sostiene en sus estudios que el comportamiento de las concentraciones estaría asociado a las características urbanísticas y meteorológicas de la zona, del mismo modo IACAQ (2019), en su informe anual indica que la disminución se debe a la limitada presencia del tráfico vehicular debido a las vacaciones de las escuelas y colegios (julio y agosto), así como al efecto meteorológico de la época de verano que presenta fuertes vientos y alta radiación solar (IAMQ, 2018).

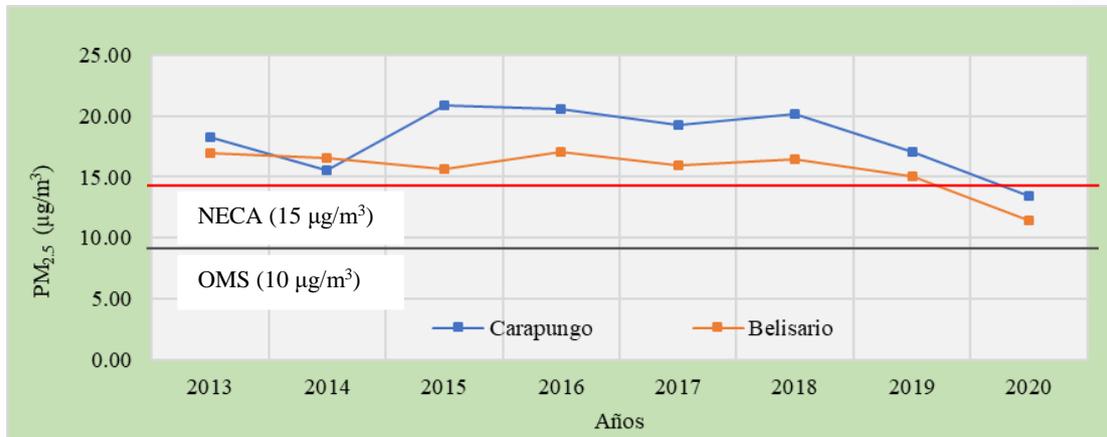
Variación anual de PM_{2.5} para Belisario y Carapungo

En la **Figura 6** se puede observar que la estación de Carapungo registro las más altas concentraciones a diferencia de Belisario durante los años evaluados. Cuyas concentraciones máximas se registraron, en el 2015 y 2016 respectivamente para Carapungo y Belisario.

En dicha figura se puede evidenciar que los valores del PM_{2.5}, superaron significativamente los valores límites de la OMS para PM_{2.5} (10 µg/m³) en todos los años evaluados para las dos estaciones, sin embargo, al comparar con la NECA anual para PM_{2.5} (15 µg/m³) los valores del año 2020 no superaron a dicha norma.

Figura 6

Variación anual de PM_{2.5} entre Belisario y Carapungo



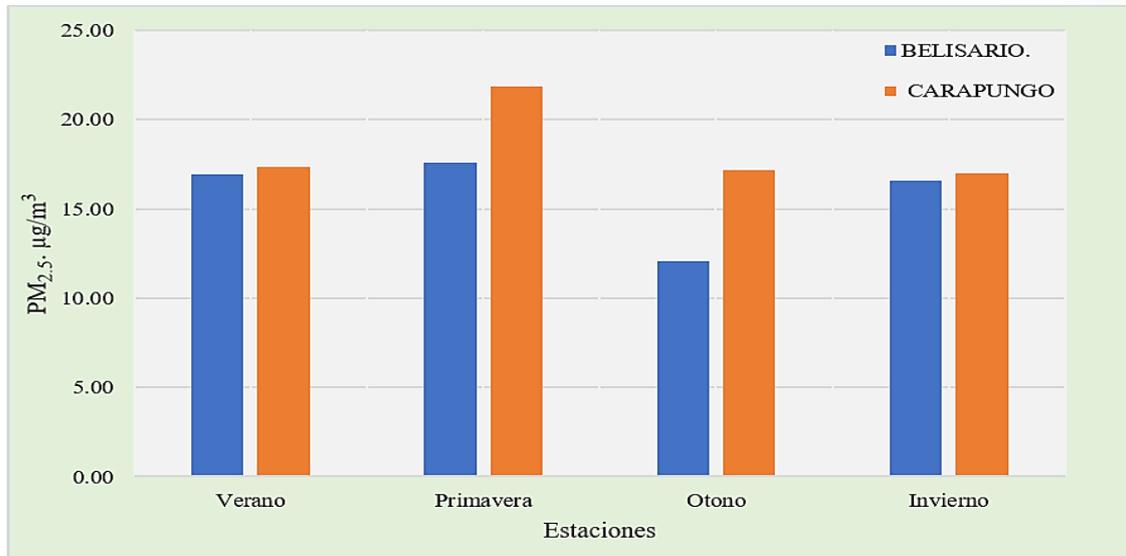
Los valores bajos registrados en año 2020 en las dos estaciones , estaría directamente relacionado con la limitada circulación y desactivación de actividades comerciales que se produjo debido al Decreto Ejecutivo No. 1017, quien declaro estado de excepción por calamidad pública en todo el territorio nacional debido al impacto del coronavirus COVID-19, que rigió a partir del 17 de marzo 2020, en dicho decreto en el artículo 4 establece la limitación del derecho a la libertad del tránsito en Ecuador, siendo este una de las principales fuentes de generación de PM_{2.5}.

Variación estacional de PM_{2.5} para Belisario y Carapungo

La **Figura 7** se muestra la variación estacional del PM₁₀ para las estaciones de Belisario y Carapungo para el periodo 2013-2020. Se observa en todas las estaciones del año los valores registrados en Carapungo fueron mayores en comparación a los obtenidos en Belisario. Del mismo modo se evidencia que los máximos valores se presentaron en la época de primavera para las dos estaciones y los mínimos en otoño e invierno para Belisario y Carapungo respectivamente. Las bajas concentraciones de PM_{2.5} en invierno puede estar asociada a las condiciones de humedad ambiental y fuertes precipitaciones (IAMQ, 2018). Mientras que las altas concentraciones pueden estar asociados a la cercanía de vías de alto tránsito vehicular, las calles sin pavimentar y las condiciones meteorológicas de la zona (Pacsi, 2016).

Figura 7

Variación estacional multianual de PM_{2.5} entre Belisario y Carapungo



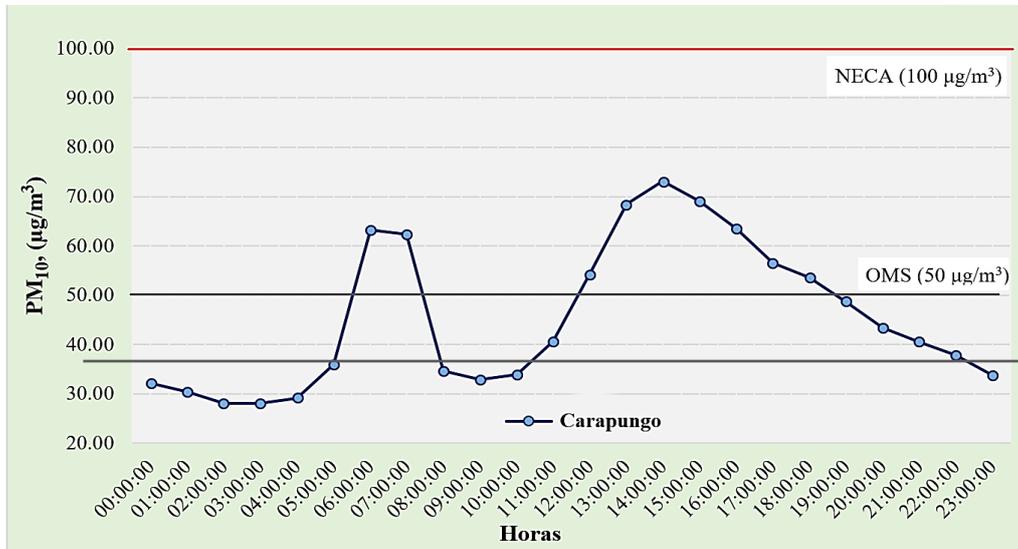
Variación horaria de PM₁₀ para Carapungo

En la **Figura 8** se observa la variación promedio horaria mensual del PM₁₀ para la estación de Carapungo durante el periodo 2013-2020. Esta variación se caracteriza por presentar dos picos máximos durante el día para todos los meses evaluados, cuyas concentraciones de incremento se presentó entre las 06:00 y 07:00 horas, así como a la 13:00 y 14:00 horas. Dicho incremento están asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar, debido a que esta estación de monitoreo está ubicado a 76 metros de la Av. Giovanni Calle (IAMQ, 2018) .

Así mismo las máximas concentraciones se registraron en el mes de setiembre a las 06:00 horas y 14:00 horas. con valores de concentración de 92.69 µg/m³ y 103.86 µg/m³ respectivamente. Los valores mínimos se registraron a las 03:00 horas (21.79 µg/m³) en el mes de mayo y 09:00 horas (22.93 µg/m³) en el mes abril. Por su parte Pacsi (2016), indica que la disminución de la concentración tiene probable relación a la disminución de las emisiones de las fuentes móviles.

Figura 8

Variación horaria multianual de PM₁₀ para Carapungo



Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario (50 µg/m³), se observa que el mes de marzo de 06:00 a 07:00 horas la concentración de PM₁₀ no supera lo establecido por dicha norma a diferencias del resto de meses que, si superan, del mismo modo se supera la norma en mención para todos los meses en el horario de 1:00 a 3:00 pm. Sin embargo, al comparar la NECA Diario para PM₁₀ (100 µg/m³) se evidencia que solo en el mes de setiembre se sobrepasa esta concentración en las horas de 14:00 a 15:00 horas.

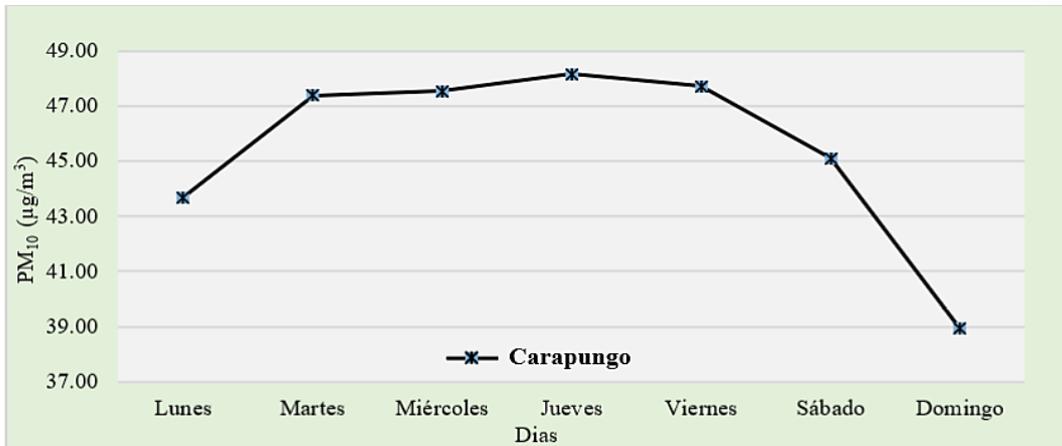
Variación diaria de PM₁₀ para Carapungo

En la **Figura 9** se muestra la variación promedio diaria mensual para periodo 2013-2020. Se observa que el máximo valor de concentración de PM₁₀ en promedio se presentó el jueves y el mínimo para el domingo, este comportamiento puede estar asociados a los patrones de usos y costumbres de la población. Además, los valores de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre superaron al promedio para todos los días.

En todos los meses los mínimos valores se registran el domingo, y los máximos miércoles y jueves, estando estrechamente relacionado con los hábitos de la población, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular. Similares resultados fueron registrados por estudios realizados por Pacsi.

Figura 9

Variación diaria multianual de PM₁₀ para Carapungo



Variación mensual de PM₁₀ para Carapungo

En la **Figura 10** se muestra las variaciones promedio mensual por año del PM₁₀ para la estación de Carapungo durante el periodo de 2013-2020. Se observa que los mayores valores de concentración de PM₁₀, se presentó en los meses de agosto y setiembre, presentando valores entre 46.81 – 78.58 µg/m³. Por su parte IACAQ (IACAQ, 2019) en su reporte anual sostiene que este comportamiento se debe a las bajas precipitaciones y fuertes vientos de la época, sumados a la falta de recubrimiento vegetal de terrenos, canteras de extracción de material pétreo y la circulación de vehículos, mismos que resuspenden el contaminante.

Figura 10

Variación mensual multianual de PM₁₀ para Carapungo



Por otro lado, los mínimos valores según el promedio mensual se registran durante los meses de marzo abril y mayo. En tal sentido Pacsi (2016), sostiene en sus estudios que este comportamiento estaría asociado a las características urbanísticas y meteorológicas de la zona, del mismo modo IACAQ (IACAQ, 2019) en su informe anual indica que esta disminución se debe a las mayores precipitaciones evitando la resuspensión de material particulado.

Del mismo modo los valores más bajos de concentración se registraron en el año 2020 en los meses de marzo, abril, mayo los cuales están relacionado con la limitada circulación y desactivación de actividades comerciales que se produjo debido al Decreto Ejecutivo No. 1017, quien declaro estado de excepción por calamidad pública en todo el territorio nacional debido al impacto del coronavirus COVID -19, que rigió a partir del 17 de marzo 2020, en dicho decreto en el artículo 4 establece la limitación del derecho a la libertad del tránsito en Ecuador, siendo este una de las principales fuentes de generación de PM₁₀.

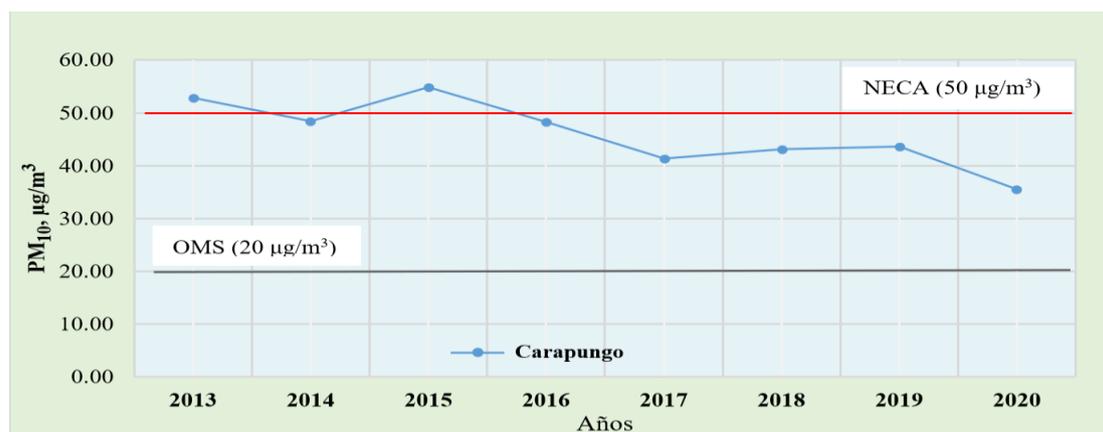
Variación anual de PM₁₀ para Carapungo

La **Figura 11** se observa la variación promedio diario anual del PM₁₀ para la estación de Carapungo durante el periodo 2013-2020. Evaluando el comportamiento de la concentración para cada año se puede observar que los máximos valores promedios de concentraciones se presentaron en el año 2015 que oscila entre 46.50 y 59.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y los mínimos valores fueron registrados en el año 2020 con valores comprendidos entre 31.75 y 37.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para todos los días evaluados.

Por otro lado, se observa que los valores del PM₁₀, superaron significativamente los valores límites del NECA anual para PM₁₀ (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y las guías de la OMS para PM₁₀ (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) para todos los años evaluados.

Figura 11

Variación anual multianual de PM₁₀ para Carapungo



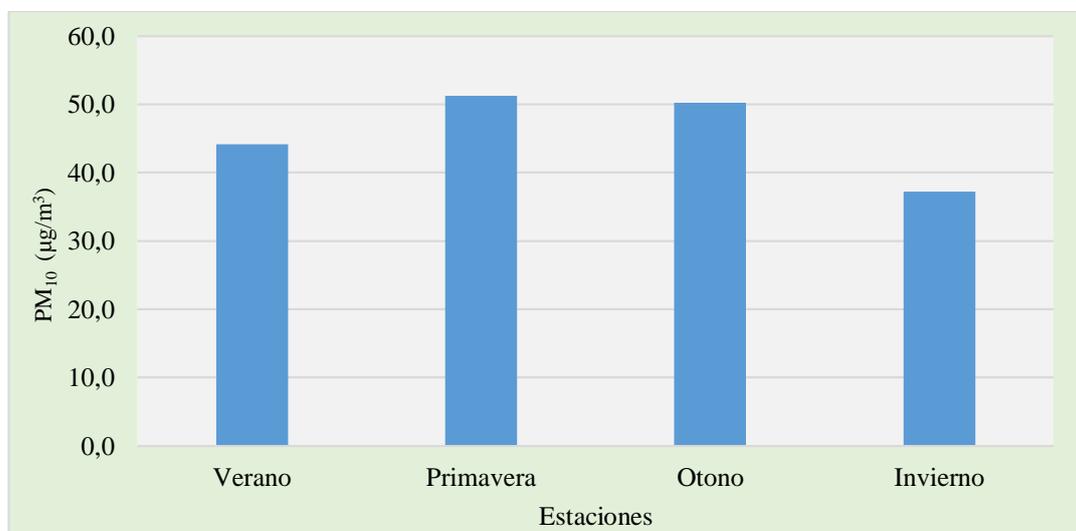
Del mismo modo se observa que el año 2020 presentó una reducción significativa de la concentración del material particulado PM_{10} , siendo alrededor del 23% respecto al promedio diario de todos los años y un 17 % respecto al año 2017 quien también se presentó como uno de los años con más bajas concentraciones durante el periodo de evaluación 2013 – 2020. Este alto porcentaje de reducción de PM_{10} se debe a la limitada circulación y desactivación de actividades comerciales que se produjo debido al Decreto Ejecutivo No. 1017, quien declaró estado de excepción por calamidad pública en todo el territorio nacional debido al impacto del coronavirus COVID-19, que rigió a partir del 17 de marzo 2020, en dicho decreto en el artículo 4 establece la limitación del derecho a la libertad del tránsito en Ecuador, siendo este una de las principales fuentes de generación de PM_{10} .

Variación estacional de PM_{10} para Carapungo

En la **Figura 12** se muestra la variación estacional del $PM_{2.5}$ para la estación de Carapungo para el periodo 2013-2020. Se evidencia que los máximos valores se presentaron en la época de primavera y los mínimos en invierno. Las bajas concentraciones de $PM_{2.5}$ en invierno puede estar asociada a las condiciones de humedad ambiental y fuertes precipitaciones (IAMQ, 2018). Mientras que las altas concentraciones pueden estar asociados a la cercanía de vías de alto tránsito vehicular, las calles sin pavimentar y las condiciones meteorológicas de la zona (Pacsi, 2016).

Figura 12

Variación estacional multianual de PM_{10} para Carapungo



Análisis de correlación Horaria de PM_{2.5}/PM₁₀ de Carapungo

En la siguiente **Tabla 2** se tiene el análisis del ratio PM_{2.5}/PM₁₀ de 0.41 para la estación de Carapungo y con respecto a otras Ciudades, Perú, Colombia, México y Chile presenta un menor ratio. Si bien las fracciones de PM_{2.5}/PM₁₀ obtenidos del análisis estadístico presenta un menor valor y si lo comparamos con los establecido por las Guías de Calidad del Aire de la (OMS, 2006) están entre 0.5 - 0.8 para ambientes urbanos, y guardan correlación con los ratios utilizados por Larsen (PM_{2.5}/PM₁₀ = 0.6) para AMVA en el año 2004 (Aguar-Gil et al., 2020).

Tabla 2

Relación de PM_{2.5}/PM₁₀ para Carapungo y otras Ciudades

País	Ciudad /zona	Estación	PM _{2.5} /PM ₁₀	
Ecuador	Quito	Carapungo	0,41	
		Santa Luzmila	0,50	
Perú*	Lima norte	María Auxiliadora	0,60	
		Lima Sur	Hipólito Unanue	0,66
		Lima Este	Conaco	0,75
		Lima Centro	Callao	0,72
		Callao	Promedio Lima	0,65
Colombia**	Bogotá		0,60	
México **	México DF		0,50 – 0,70	
Chile **	Santiago		0,40 – 0,60	
Inglaterra **	Birmingham		0,50 – 0,80	
España **	Barcelona		0,60	

Fuente: * Pacsi (2016), ** Galvis & Rojas (2006), Pandey et al. (2012), Rojas & Galvis (2005)

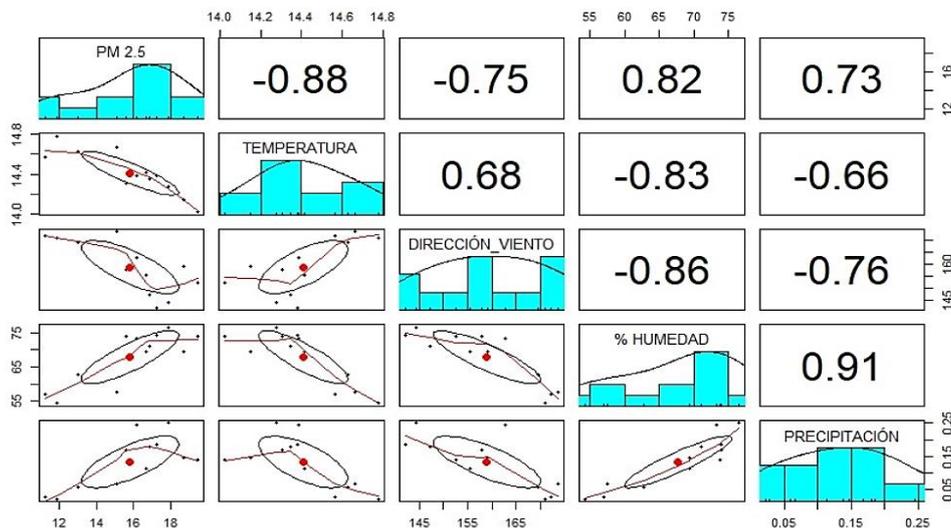
Correlaciones de PM_{2.5} multivariante para la estación Belisario

La **Figura 13**, presenta las correlaciones del Material Particulado PM_{2.5} con la temperatura es de -0.88 y la dirección del viento es -0.75 indicando una relación significativa inversa, es decir que cuando aumentan estos factores meteorológicos el PM_{2.5} disminuye. La humedad relativa con un valor de 0.82 y la precipitación con un valor de 0.73 tienen una relación significativa directa, es decir, cuando aumenta el porcentaje de humedad relativa y la precipitación, puede aumentar el material particulado PM_{2.5}. El estudio de Yang et al. (2021), que evalúa los efectos meteorológicos en varias ciudades de China, observó que la velocidad del viento, la temperatura y las precipitaciones son los principales factores meteorológicos que influyen en la concentración de PM_{2.5}, esto afirma que en la ciudad de Quito también existe influencia de los factores meteorológicos en el PM_{2.5}.

La fuerza de la correlación del $PM_{2.5}$ bien sea negativa o positiva depende también de otros factores como topografía, localización por lo cual puede existir variabilidad de la correlación entre diferentes zonas y no necesariamente debe ser igual en todas las localizaciones geográficas tal como lo deduce el estudio de la variación del $PM_{2.5}$ realizado por Yang et al. (2017), en China. La topografía de la zona en que se ubica la ciudad de Quito presenta la forma de una cuenca que tiene en las elevaciones pertenecientes al ramal occidental de la cordillera de Los Andes, el macizo del Guagua y el Ruco Pichincha, creando una especie de barrera natural que limita la libre circulación del viento y consecuentemente, la capacidad de la atmósfera de dispersar los contaminantes es bajo, este es un fenómeno común de las ciudades que están en valles; es decir su baja ventilación, hace que Quito, salvo los meses muy secos de mediados del año, tenga vientos promedio de entre uno y dos metros por segundo, bastante más bajos que los que experimentan poblaciones localizadas en amplias sabanas como Bogotá (Páez, 2012).

Figura 13

Correlación del PM_{10} y $PM_{2.5}$ con los factores meteorológicos en la estación Belisario



Correlaciones de PM multivariante para la estación Carapungo

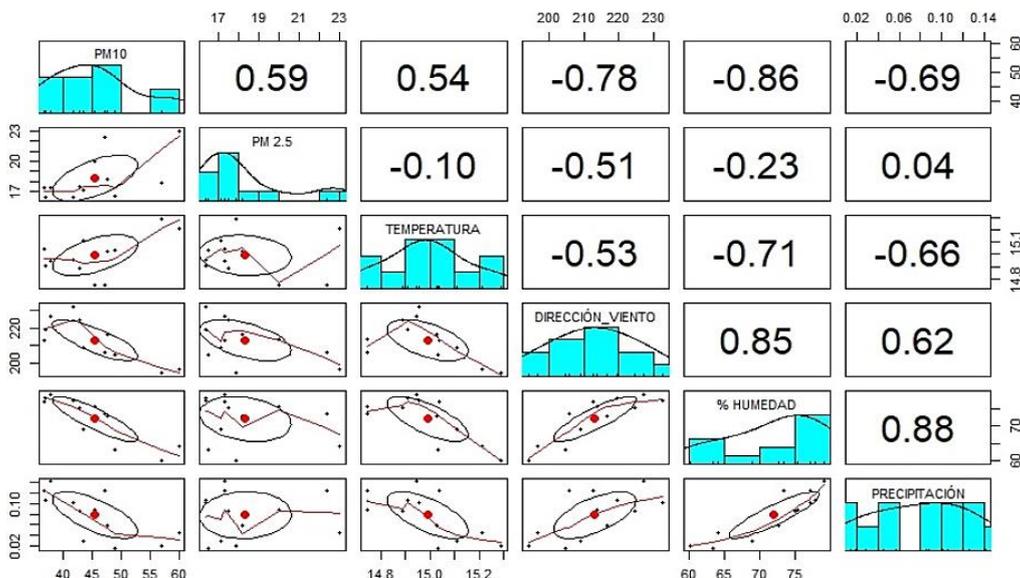
La **Figura 14**, presenta correlaciones insignificantes del $PM_{2.5}$ en la estación Carapungo con la temperatura (-0.10) la humedad relativa (-0.23) y la precipitación (0.04). La correlación del $PM_{2.5}$ con la dirección del viento es de -0.51 indicando una correlación significativa del tipo inversa. Podemos notar entre las dos estaciones de medición de $PM_{2.5}$ que no hay una relación y pueden deberse a varias condiciones topográficas de la ciudad ya que la estación Belisario se encuentra en el centro financiero de la ciudad el cual tiene las características de estar rodeada por montañas y la estación Carapungo se

encuentra en una zona aledaña en la que no interviene tanto la zona montañosa, este se corrobora en la **Figura 1**.

La fuerza de la correlación del PM_{2.5} bien sea negativa o positiva depende también de otros factores como topografía, localización por lo cual puede existir variabilidad de la correlación entre diferentes zonas y no necesariamente debe ser igual en todas las localizaciones geográficas tal como lo deduce el estudio de la variación del PM_{2.5} realizado por Yang et al. (2017), en China. La topografía de la zona en que se ubica la ciudad de Quito presenta la forma de una cuenca que tiene en las elevaciones pertenecientes al ramal occidental de la cordillera de Los Andes, el macizo del Guagua y el Ruco Pichincha, creando una especie de barrera natural que limita la libre circulación del viento y consecuentemente, la capacidad de la atmósfera de dispersar los contaminantes es bajo, este es un fenómeno común de las ciudades que están en valles; es decir su baja ventilación, hace que Quito, salvo los meses muy secos de mediados del año, tenga vientos promedio de entre uno y dos metros por segundo, bastante más bajos que los que experimentan poblaciones localizadas en amplias sabanas como Bogotá (Páez, 2012).

Figura 14

Correlación del PM₁₀ y PM_{2.5} con los factores meteorológicos en la estación Carapungo



El PM₁₀ tiene una correlación de 0.54 con la temperatura indicando una relación significativa de tipo directa, es decir, que al aumentar la temperatura también aumenta el PM₁₀. Los valores de correlación con la dirección del viento (-0.78), porcentaje de humedad (-0.86) y la precipitación (-0.69), indican una relación significativa del tipo

inversa de estos factores meteorológicos con el PM₁₀, es decir, al disminuir los valores de estos factores meteorológicos, aumenta el PM₁₀.

Conclusiones

- El análisis exploratorio indica que el conjunto de datos de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en las estaciones de Belisario y Carapungo cumplen con el criterio de normalidad definido por las medidas de tendencia central parecidas y el análisis de los gráficos de histogramas y QQ-plot.
- El diagrama de cajas y bigotes indica que el conjunto de datos presenta valores atípicos en su mayoría con concentraciones muy altas respecto a la media, que podría haberse dado por eventos antropogénicos o naturales.
- Del estudio realizado en las estaciones de Carapungo y Belisario para el PM_{2.5} se obtuvieron que las máximas concentraciones de están entre las 06:00 horas y 08:00 horas de 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio para luego disminuir a niveles debajo de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendados por la OMS.
- Los valores del PM₁₀ obtenidos para Carapungo superaron significativamente los valores límites del NECA anual para PM₁₀ (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y las guías de la OMS para PM₁₀ (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) para todos los años evaluados.
- En los análisis efectuados para PM₁₀ Carapungo y Belisario se obtuvo resultados de un alto porcentaje de reducción de PM₁₀ debido a la limitación en el tráfico vehicular y la desactivación de actividades comerciales por el Decreto Ejecutivo No. 1017-EC, declarando el estado de excepción por calamidad pública en todo el territorio nacional debido al impacto del coronavirus COVID -19.
- El PM_{2.5} y PM₁₀ en los análisis con respecto a las variables meteorológicas para las estaciones Belisario y Carapungo presenta una relación directamente proporcional con respecto a las precipitaciones pluviales como lo evidencia lo ocurrido en el 2017 (Fenómeno del Niño).
- Los factores climáticos analizados, precipitación, temperatura, dirección del viento y humedad relativa fueron evaluados respecto al PM_{2.5} y PM₁₀ de las dos estaciones, mediante el método de Spearman, el cual entrega valores muy bajos reflejando que el material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Quito, el área analizada no depende de estos factores climáticos, que puede deberse a la topografía específica de la ciudad la cual se encuentra rodeada de montañas.
- El modelamiento desarrollado para las estaciones de Belisario y Carapungo del material particulado PM_{2.5}, los resultados evidencian que existe una correlación estadísticamente significativa.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

Financiamiento

Los autores declaran que no recibieron financiamiento

Agradecimiento

Los autores reflejan su agradecimiento a cada una de las Instituciones de Educación Superior que representan. Ejemplo del desarrollo de investigaciones multidisciplinarias e interdisciplinarias, bajo colaboración binacional Ecuador-Perú entre la Universidad Estatal de Bolívar (UEB), Guaranda, Ecuador; Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), La Libertad, Ecuador, y la Universidad Nacional del Callao (UNAC), Lima, Perú, mismas que aportaron al desarrollo del presente artículo científico.

Referencias Bibliográficas

- Aguiar-Gil, D., Gómez-Peláez, L. M., Álvarez-Jaramillo, T., Correa-Ochoa, M. A., & Saldarriaga-Molina, J. C. (2020). Evaluating the impact of PM2.5 atmospheric pollution on population mortality in an urbanized valley in the American tropics. *Atmos. Environ.* 224. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117343>
- Alvarez-Mendoza, C. I., Teodoro, A., Freitas, A., & Fonseca, J. (2020). Spatial estimation of chronic respiratory diseases based on machine learning procedures—an approach using remote sensing data and environmental variables in Quito, Ecuador. *Appl. Geogr.* 123, 102273. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102273>
- Barry, M. & Annesi-Maesano, I. (2017). Ten principles for climate, environment, and respiratory health. *Eur. Respir. J.* 50, e1701912. <https://doi.org/10.1183/13993003.01912-2017>
- Cornejo-Vásconez, D., Rodríguez-Espinosa, F., Guasumba, A., & Toulkeridis, T. (2022). Efectos contrastivos de la evaluación de la contaminación ambiental en dos zonas del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. *La Granja* 36, 98–112. <https://doi.org/http://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.08>
- De Jesus, A. L., Rahman, M. M., Mazaheri, M., Thompson, H., Knibbs, L. D., Jeong, C., Evans, G., Nei, W., Ding, A., Qiao, L., Li, L., Portin, H., Niemi, J. V., Timonen, H., Luoma, K., Petäjä, T., Kulmala, M., Kowalski, M., Peters, A., Cyrys, J., Ferrero, L., Manigrasso, M., Avino, P., Buonano, G., Reche, C., Querol, X.,

- Beddows, D., Harrison, R.M., Sowlat, M.H., Sioutas, C., & Morawska, L. (2019). Ultrafine particles and PM_{2.5} in the air of cities around the world: Are they representative of each other? *Environ. Int.* 129, 118–135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.021>
- Galvis, B., & Rojas, N. Y. (2006). Relación entre PM_{2,5} y el PM₁₀ en la ciudad de Bogotá. *Acta nov.* 3, 336–353. Available from: <https://www.cervantesvirtual.com/portales/literatura/obra/relacion-entre-pm25-y-pm10-en-la-ciudad-de-bogota-850628/>
- He, Y., Wang, X., & Zhang, Z. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a sediment core from Lake Taihu and their associations with sedimentary organic matter. *Journal of Environmental Sciences.* 21, e013. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.09.013>
- Reporte Anual de la Calidad del Aire en el DMQ - 2019 (IACAQ), 2019. *Informe de la Calidad del Aire del Distrito Metropolitano Quito*. Secretaria de Ambiente. Quito. Available from: http://www.quitoambiente.gob.ec/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/Informe_Calidad_Aire_2019.pdf
- Informe de la Calidad del Aire Quito año 2018 (IAMQ/18), 2018. *Informe de la Calidad del Aire del Distrito Metropolitano Quito 2018*. Secretaria de Ambiente. Quito. Available from: http://www.quitoambiente.gob.ec/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/Informe_Calidad_Aire_2018.pdf
- Jiaxin, C., Hui, H., Feifei, W., Mi, Z., Ting, Z., Shicheng, Y., Ruoqiao, B., Nan, C., Ke, X., & Hao, H. (2021). Air quality characteristics in Wuhan (China) during the 2020 COVID-19 pandemic. *Environ. Res.* 195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110879>
- Khomsy, K., Najmi, H., Amghar, H., Chelhaoui, Y. & Souhaili, Z. (2021). COVID-19 national lockdown in morocco: Impacts on air quality and public health. *One Heal.* 11, 100200. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2020.100200>
- Legarreta, A., Corral, A., Delgado, M., Torres, J., & Flores, J. (2015). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. *Culcyt/ Medio Ambiente, No 56, Especial No 1,* 234- 245. <https://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/818>
- Pacsi, S. (2016). Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en Lima Metropolitana. *Científicos* 77, 273–

283. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21704/ac.v77i2.699>
- Páez, C. (2012). Gestión de la contaminación atmosférica urbana: El caso de Quito. *FLACSO Andes* 1–17. Available from: <https://flacsoandes.edu.ec/web/imagesFTP/10088.ContaminacionQuito.pdf>
- Pandey, P., Khan, A. H., Verma, A. K., Singh, K. A., Mathur, N., Kisku, G. C., & Barman, S. C. (2012). Seasonal Trends of PM_{2.5} and PM₁₀ in Ambient Air and Their Correlation in Ambient Air of Lucknow City, India. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 88, 265–270. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00128-011-0466-x>
- Rodríguez-Guerra, A., & Cuvi, N. (2019). Contaminación del aire y justicia ambiental en Quito, Ecuador. *Front. J. Soc. Technol. Environ. Sci.* 8, 13–46. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2019v8i3.p13-46>
- Rojas, N., & Galvis, B. (2005). Relationship between PM_{2.5} and PM₁₀ in Bogotá. *Rev. Ing.* 54–60. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200006&lng=en&nrm=iso. ISSN 0121-4993.
- Rönkkö, T. J., Hirvonen, M. R., Happonen, M. S., Leskinen, A., Koponen, H., Mikkonen, S., Bauer, S., Ihanntola, T., Hakkarainen, H., Miettinen, M., Orasche, J., Gu, C., Wang, Q., Jokiniemi, J., Sippula, O., Komppula, M., & Jalava, P.I. (2020). Air quality intervention during the Nanjing youth olympic games altered PM sources, chemical composition, and toxicological responses. *Environ. Res.* 185, 109360. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109360>
- Ryu, H. J., Seo, M. R., Choi, H. J., Cho, J., & Baek, H. J. (2021). Particulate matter (PM₁₀) as a newly identified environmental risk factor for acute gout flares: A time-series study. *Jt. Bone Spine* 88, 105108. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2020.105108>
- Valencia, V. H., Hertel, O., Ketzler, M., & Levin, G. (2020). Modeling urban background air pollution in Quito, Ecuador. *Atmos. Pollut. Res.* 11, 646–666. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.12.014>
- Veld, M. in't, Pandolfi, M., Amato, F., Pérez, N., Reche, C., Uzu, G., Dominutti, P., Jaffrezo, J., Alastuey, A., & Querol, X. (2022). Discovering oxidative potential (OP) drivers of atmospheric PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ simultaneously in North-Eastern Spain. *Build. Environ.* 22, e109181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159386>
- Wu, T. Y., Horender, S., Tancev, G., & Vasilatou, K. (2022). Evaluation of aerosol-spectrometer based PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentration measurement using

ambient-like model aerosols in the laboratory. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 201, 111761. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111761>

Yang, Q., Yuan, Q., Li, T., Shen, H., & Zhang, L. (2017). The relationships between PM2.5 and meteorological factors in China: Seasonal and regional variations. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 14. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121510>

Yang, Z., Yang, J., Li, M., Chen, J., & Ou, C. Q. (2021). Nonlinear and lagged meteorological effects on daily levels of ambient PM2.5 and O3: Evidence from 284 Chinese cities. *J. Clean. Prod.* 278, e123931. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123931>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Conciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Conciencia Digital**.



Indexaciones

