

DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CARBÓN NEGRO EN PM_{2.5} MUESTREADO EN UNA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE LIMA, PERÚ

Rafael Zafra Saavedra^{*a}, José H. Inoue^b, Lizeth Najarro Méndez^c, Hanns Gómez Muñoz^d, Jhojan P. Rojas-Quincho^e, Patricia Bedregal Salas^f

RESUMEN

El carbón negro (BC por sus siglas en inglés) puede ser emitido a la atmósfera por la combustión incompleta de combustibles fósiles y la quema de biomasa. Su cuantificación es de vital importancia debido a los efectos en la salud de los seres vivos y el cambio climático. Setenta y cinco (75) muestras de material particulado con diámetro menor a 2.5 micras (PM_{2.5}) fueron recolectadas con un muestreador de flujo másico de alto volumen, en la estación ubicada en el distrito de Jesús María (Lat. 12°04'14.5", Long. 77°02'35.5", Alt. 133 m.s.n.m) de Lima Metropolitana. La determinación de las concentraciones de carbón negro (BC) se realizó utilizando un instrumento de absorción de longitud de onda múltiple (MABI, por sus siglas en inglés). Los resultados obtenidos del PM_{2.5} mostraron que la calidad del aire no es buena si se consideran las directrices recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 15 µg/m³, como promedio de 24 horas, mientras que el 96% de los datos si cumplieron con los Estándares de Calidad Ambiental para el Perú de 50 µg/m³. Se obtuvo una concentración promedio de BC de 0.74 µg/m³, con un resultado máximo de 1.55 µg/m³ y mínimo de 0.45 µg/m³ proveniente del denso tráfico vehicular de la zona, considerando que durante los fines de semana se manifiesta una significativa disminución.

Palabras clave: carbón negro, PM_{2.5}, BC, material particulado, contaminación del aire

^a Facultad de Química, Universidad Nacional Federico Villarreal, Jr. Chepén 290, El Agustino, Lima, Perú. 2016033383@unfv.edu.pe

^b Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. jose.hitochi@gmail.com

^c Facultad de Química, Universidad Nacional Federico Villarreal. 2017020639@unfv.edu.pe

^d Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. hgomez@senamhi.gob.pe

^e Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. jhojanrojas14@gmail.com; jprojas@senamhi.gob.pe

^f Laboratorio de Técnicas Analíticas, Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear. pbedregal@ipen.gob.pe

DETERMINATION OF BLACK CARBON CONCENTRATION IN PM_{2.5} SAMPLED IN AN URBAN AREA OF LIMA CITY, PERU

ABSTRACT

Black carbon (BC) can be emitted into the atmosphere from incomplete combustion of fossil fuels and biomass burning. Its quantification is of vital importance due to the effects on the health of living beings and climate change. Seventy-five (75) samples of particulate matter smaller than 2.5 microns in diameter (PM_{2.5}) were collected with a high-volume mass flow sampler at the station located in the Jesús María district (Lat. 12°04'14.5", Lon. 77°02'35.5", Alt. 133 m.a.s.l.) of Metropolitan Lima. The determination of black carbon (BC) concentrations was performed with a multi-wavelength absorption instrument (MABI). The results obtained for PM_{2.5} showed that the air quality is not good if the guidelines recommended by the World Health Organization (WHO) of 15 µg/m³, as a 24-hour average, are considered; while 96% of the data complied with the Environmental Quality Standards for Peru of 50 µg/m³. An average BC concentration of 0.74 µg/m³ was obtained, with a maximum result of 1.55 µg/m³ and a minimum of 0.45 µg/m³ from the dense vehicular traffic in the area, considering that during weekends there is a significant decrease.

Keywords: black carbon, PM_{2.5}, BC, particulate matter, air contamination

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los principales desafíos ambientales a nivel global, con efectos significativos sobre la salud pública, contribuyendo a la incidencia de enfermedades respiratorias, enfermedades cardiovasculares y al ambiente. La preocupación mundial por la contaminación del aire, se ha manifestado a través de estudios e investigaciones, en los que se determinan diferentes componentes de aerosoles atmosféricos en zonas urbanas¹⁻⁷. Aerosoles atmosféricos se refiere a un sistema de pequeñas partículas o gotas líquidas suspendidas en una fase gaseosa⁸. Además de O₂, N₂, gases nobles, vapor de agua, O₃, radicales y iones, la atmósfera troposférica contiene también aerosoles procedentes de emisiones naturales o antropogénicas (volcanes, polvo, incendios forestales)⁹. Las actividades humanas contribuyen a generar atmósferas contaminadas con compuestos tóxicos afectando la calidad de vida de los habitantes, la vegetación y el clima.

El término aerosoles atmosféricos es bastante amplio y complejo, es por ello que, autoridades americanas para temas de salud usan el término de partículas en suspensión o material particulado. En 1971 se establecieron las primeras normas nacionales de calidad del aire para las partículas totales en suspensión (PTS), las cuales tienen un diámetro menor a 100 micras. La investigación sobre los efectos en la salud se centró en las partículas suficientemente pequeñas como para ser inhaladas hacia los pulmones. En 1987, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) centró su atención sobre el PM con un diámetro menos a 10 micras (PM₁₀). En

1997, después de evaluar cientos de estudios de salud y llevar a cabo un extenso proceso de revisión por pares, le EPA estableció normas para el material particulado menor a 2,5 micras ($PM_{2.5}$)¹⁰.

El material particulado o (PM por sus siglas en inglés), está compuesto por partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire y es el término genérico para una amplia clase de sustancias químicas y físicamente diversas que existen como partículas discretas de diferentes tamaños. Las partículas pueden ser emitidas directamente o formarse en la atmósfera por transformaciones de emisiones gaseosas como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Las propiedades químicas y físicas del PM varían enormemente con el tiempo, la región, la meteorología y la categoría de fuente, complicando así la evaluación de los efectos sobre la salud y el bienestar. De acuerdo a su tamaño, pueden penetrar en diferentes regiones del tracto respiratorio humano. Las partículas torácicas, corresponden a las PM_{10} y son las que viajan más allá de la laringe para alcanzar las vías respiratorias pulmonares y la región de intercambio de gases del pulmón y las $PM_{2.5}$ son las partículas respirables que pueden alcanzar los alvéolos pulmonares¹¹, entrar al torrente sanguíneo y provocar enfermedades cardiovasculares. Además, el material particulado, especialmente de origen antropogénico, puede afectar al sistema climático y al ciclo hidrológico de la Tierra al alterar las propiedades de radiación de la atmósfera, es decir la cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre y que es conocida como radiación de forzamiento directo (DFR por sus siglas en inglés). Gran parte de la DFR es producida por el carbono negro (BC), liberado por la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa y, en menor medida, por los incendios naturales, siendo el mayor absorbente de la radiación solar visible¹². Observaciones por satélite, in situ y en tierra, concluyeron que la absorción solar global (es decir, el forzamiento radiativo directo, DRF) por el BC atmosférico es de hasta $0,9 \text{ W.m}^{-2}$ (vatios por metro cuadrado) sólo superado por el DRF del CO_2 ¹³. Esta capacidad de fuerte absorción de la luz visible sumado a su resistencia a la transformación química, le confiere, a esta fracción de material particulado carbonoso, relevancia en diversos campos de investigación relacionados con la calidad ambiental del aire, el cambio climático, la química del aire, la bioquímica y la paleoclimatología¹⁴.

Países de América como Canadá han establecido un valor de concentración deseable en el ambiente para el BC de $10 \mu\text{g/m}^3$ (como promedio en 24 horas), basado en la protección contra los efectos adversos para la salud y el ambiente¹⁵.

En el Perú, de acuerdo al protocolo nacional de monitoreo de la calidad ambiental del aire, se realizan tres tipos de monitoreo¹⁶ para la prevención/evaluación de riesgos en la salud ambiental, el cual viene siendo ejecutado por la Dirección de Salud Ambiental (DIGESA)¹⁷, monitoreo en áreas asociadas a actividades extractivas, productivas y de servicios; desarrollado por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA)¹⁸ y por último el monitoreo vinculado a planes de acción para la mejora de la calidad del aire, el cual es desarrollado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)¹⁹ y gobiernos locales. Cabe precisar, que a la fecha no se viene realizando el monitoreo de concentraciones de BC, descrito como el segundo mayor factor del calentamiento que contribuye al cambio climático, siendo el principal componente del hollín²⁰. El problema de la contaminación, se acrecienta en lugares de alta densidad poblacional, como la ciudad de Lima, que concentra al 30.2% de la población del Perú y de ésta, el 83.1% reside en el área urbana²¹.

En este trabajo, queremos contribuir con información sobre la concentración de carbono negro obtenido en el muestreo realizado en la estación de monitoreo de calidad del aire

Campo de Marte (CDM) del SENAMHI ubicado en el distrito de Jesús María, zona central y urbana de Lima Metropolitana. Consideramos que el estudio realizado dará lugar a que los tomadores de decisiones tomen acciones que permitan mitigar sus efectos a la salud de los habitantes y al cambio climático.

PARTE EXPERIMENTAL

Procedimiento de muestreo del PM_{2.5}

El muestreo se llevó a cabo entre el 14 de marzo al 29 de setiembre de 2023, utilizando un muestreador calibrado de flujo másico de alto volumen (TISH TE – 6070 DBLX-2,5) y filtros de cuarzo de 203 x 254 mm. Dichos muestreos se realizaron por 24 horas, con cambio de filtro cada 3 días y manteniendo un flujo constante de aire de 1600 m³/día, siguiendo las recomendaciones dadas en ²². Para el acondicionamiento de los filtros para el pre-pesado, fueron sometidos a una temperatura de 600°C en una mufla por 4 horas, con la finalidad de asegurar que queden libres de materia orgánica. Luego pesados en una balanza analítica de precisión (Mettler Toledo XP 205), con legibilidad $d = 0.01$ mg y temperatura y humedad controladas ($60\% \pm 3\%$ y $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$).

Se obtuvieron 75 muestras de la estación de monitoreo de calidad del aire CDM del SENAMHI, ubicada en una zona central y urbana del, distrito de Jesús María. Los filtros conteniendo el material particulado, fueron cuidadosamente trasladados al laboratorio, protegidos en sobres y en contenedores, manteniéndolos a temperatura y humedad controladas (< 10 grados Celsius). Una vez en el laboratorio, fueron almacenados bajo refrigeración, hasta el análisis.



Figura 1. Ubicación del equipo de muestreo de alto volumen para PM_{2.5} en la Estación de monitoreo de la calidad del aire CDTM en el distrito de Jesús María, Lima (Lat.: 12°04'14.5", Long.: 77°02'35.5", Alt.: 133 m.s.n.m.)

Determinación de la concentración másica de PM_{2,5}

Utilizando pinzas de teflón y guantes de nitrilo, se colocó el filtro en la balanza analítica de precisión para determinar la masa, después del muestreo. Con los datos obtenidos durante el muestreo, se calculó la concentración másica del PM_{2,5} empleando la siguiente ecuación:

$$PM_{2,5} \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = \left(\frac{Pf - Pi}{V} \right)$$

Donde:

Pf : = Peso del filtro de cuarzo después del muestreo (μg)

Pi = Peso del filtro de cuarzo antes del muestreo (μg)

V = Volumen de aire muestreado a través del filtro (m^3)

Determinación de la concentración de Carbono Negro (BC) y Carbono Negro de Quema de Biomasa (BCQ)

La determinación de BC se realizó midiendo el carbono absorbente de luz (LAC, por sus siglas en inglés), que hace referencia al componente de partículas generado tanto por la combustión incompleta de combustibles fósiles, como por biomasa. Para ello, se utilizó el instrumento de absorción de carbono negro de longitud de onda múltiple (MABI, por sus siglas en inglés), con el cual, se midió la transmisión de la luz de los filtros, conteniendo el material particulado, a las longitudes de onda de 405 nm, 639 nm y 1050 nm.

Se obtuvo el contenido del LAC, midiendo primero la transmisión de luz en una porción del filtro blanco de 30 x 30 mm antes del muestreo (I_0) y la transmisión de luz post-muestreo (I), a la longitud de onda de 639 nm. Para la medición, el equipo utiliza el software MABI MKII DAQ V2.20

La concentración de BC se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$BC \text{ (ngm}^{-3}\text{)} = \frac{10^5 \cdot A}{\varepsilon \cdot V} \cdot \ln \frac{I_0}{I}$$

Donde:

A = área de recolección del filtro expuesto en (cm^2)

V = volumen de aire muestreado a través del filtro en (m^3)

ε = Coeficiente de absorción de masa para el filtro (m^2/g) como una función de la longitud de onda λ (nm).

I_0 = transmisión de luz medida a través del filtro antes del muestreo

I = transmisión de luz medida a través del filtro después del muestreo

Los valores del coeficiente de absorción de masa ε para LAC están comprendidos dentro del rango de 4 – 9 m^2/g para partículas finas de PM_{2,5}, mientras que para partículas gruesas PM_{2,5-10} es significativamente menor entre 1 y 2 m^2/g . Para el presente estudio, se adoptó el valor de ε ($\lambda = 639$ nm) igual a 6.473²³.

Se determinó la concentración de la masa del BC procedente de quema de biomasa (BCQ) sustrayendo el resultado de BC (1050 nm) del valor del BC (450 nm)²⁴.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se presenta el resultado del promedio de la concentración másica del PM_{2,5}, que corresponde a 21.8 µg/m³. Este valor supera el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 15 µg/m³²⁵, aunque se encuentra por debajo del estándar de calidad ambiental para aire (ECA) del Perú, de 50 µg/m³²⁶. En la tabla 2 se pueden ver los promedios mensuales de concentración másica. El mes de julio ha sido el de mejor calidad del aire, cumpliéndose con los lineamientos recomendados por la OMS, a diferencia del mes de abril donde los supera, en más del 50%. La figura 2 muestra que, en 03 días de los 75, (días 23, 25 y 30 de abril), se sobrepasó los ECA, indicando que han sido días de una calidad del aire no saludable. A partir de junio y hasta el término del muestreo, la concentración másica del PM_{2,5} disminuyó; esto estaría influenciado por el evento de El Niño Costero, de categoría fuerte, el cual provocó anomalías positivas de la temperatura superficial del mar frente a las costas de Lima²⁷. De esta manera, la presencia de aguas anormalmente más calientes, puede cambiar notablemente la estructura térmica en la capa de inversión característica de Lima, debilitándola y favoreciendo condiciones atmosféricas inestables²⁸, lo cual favorece que los contaminantes del aire como el PM_{2,5} puedan dispersarse. El valor de los lineamientos recomendados por la OMS en cuanto al PM_{2,5} es el ideal. Sin embargo, también propone valores objetivo intermedios de 5 µg/m³, 10 µg/m³, 15 µg/m³, 25 µg/m³ hasta 35 µg/m³, como pasos graduales para una reducción progresiva de la contaminación para zonas donde la contaminación es elevada²⁵. Es importante considerar el tiempo de exposición a una calidad del aire insalubre, ya que según sea el tiempo de exposición corto o largo, serán los efectos sobre la salud. Por tiempos de exposición cortos, los efectos están relacionados a enfermedades respiratorias, como tos, carrasperas, infecciones respiratorias, e incluso cardiovasculares. Los efectos atribuidos a tiempos de exposición largo, podrían producir: incidencia y prevalencia de enfermedades respiratorias crónicas, cambios crónicos en las funciones fisiológicas, cáncer al pulmón, enfermedades cardiovasculares crónicas, entre las más graves²⁹.

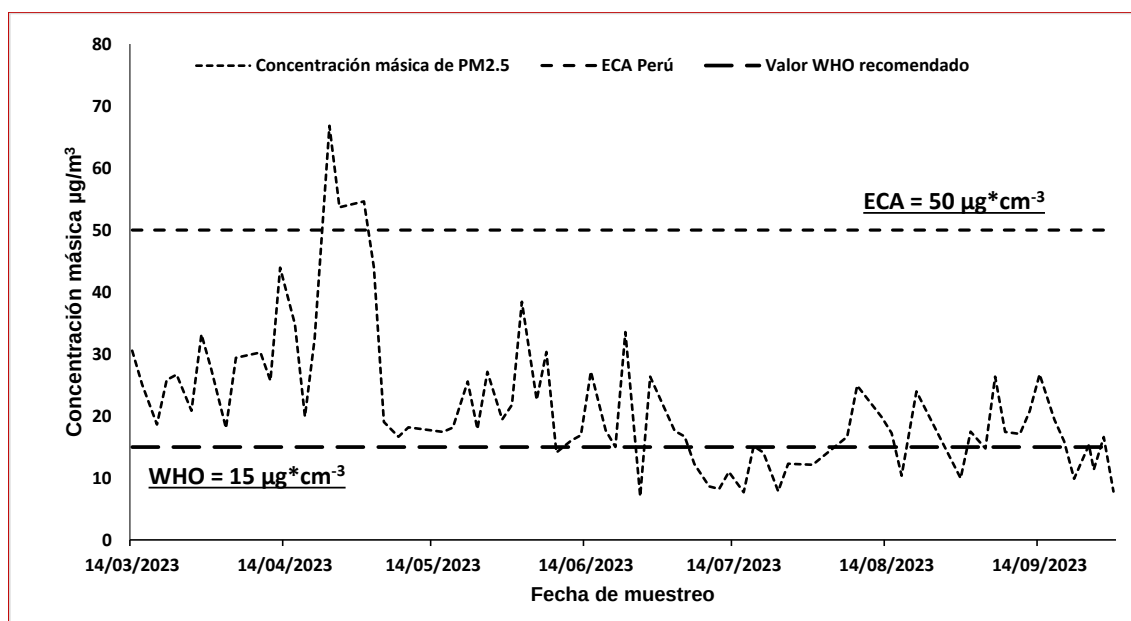
Tabla 1 : Estadísticos descriptivos de las concentraciones del PM_{2,5} obtenidos en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM en Jesús María (14 de marzo – 29 de setiembre de 2023)

Especie	Promedio (µg/m ³)	Mínimo (µg/m ³)	Máximo (µg/m ³)	Desv. Est. (s)	Días muestreados
PM 2.5	21.8	7	66.8	11.2	75

Tabla 2 : Promedio mensual y desviación estándar de las concentraciones del PM_{2,5} en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM Jesús María (marzo - septiembre 2023)

Meses	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	s
Marzo	26	4.7
Abril	37.2	15.6
Mayo	22.3	7.9
Junio	22.1	9.2
Julio	12	3.4
Agosto	17.5	5.5
Septiembre	16.9	5.6

Los datos obtenidos de PM_{2,5}, indican un incremento respecto a estudios anteriores que reportaron un promedio de 16.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 2014 y 2015⁵ y de 16.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 2010 y 2016³⁰, esto sugiere un deterioro en la calidad del aire en el distrito Jesús María. Este incremento no debe pasar desapercibido y es preocupante, especialmente considerando que cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{2,5} se asocia con un aumento del 0.9% en la mortalidad por diversas causas y un 0.47% en mortalidad por enfermedades respiratorias³¹. La afectación se extiende a Lima Metropolitana, considerando que las partículas se dispersan en el ambiente por acción del aire y otros factores meteorológicos, como se demuestra entre países que comparten fronteras, como China y Corea, estimándose que el transporte a larga distancia de contaminantes atmosféricos procedentes de China, representa aproximadamente entre el 26 y el 30% del PM₁₀ anual en Corea del Sur³².

**Figura 2.** Concentraciones del PM_{2,5} en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM en Jesús María (14 de marzo – 29 de setiembre de 2023)

El resultado obtenido de la concentración promedio de carbono negro (BC) fue de $0.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tabla 3. Al comparar este valor con el de otras áreas urbanas, se observa que se encuentra en un rango similar al de ciudades como Juriquilla en México ($0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y Vitoria en Brasil ($0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)³³.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de BC en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM en Jesús María (14 de marzo – 29 de setiembre de 2023)

Especie	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	s	Días muestreados
BC	0.74	0.45	1.55	0.20	75

Es importante destacar que, estudios han demostrado que concentraciones de BC superiores a $1.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ están asociadas con efectos adversos a la salud, como arritmias y enfermedades cardíacas (34). Aunque la concentración promedio en Jesús María fue 46% más baja, la vigilancia y el monitoreo continuo son fundamentales para garantizar la salud pública y prevenir los efectos del cambio climático. Asimismo, las concentraciones se encuentran por debajo del valor establecido por los Criterios de Calidad del aire de Ontario-Canadá, de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio de 24 horas).

En general, la mayor parte de valores de concentración de carbono negro están entre 0.5 y $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con el mayor valor de $1.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en el muestreo del 14 de marzo, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Promedio Mensual y Desviación Estándar de las concentraciones del BC obtenidas en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM en Jesús María (marzo - setiembre 2023)

Meses	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	s
Marzo	0.94	0.31
Abril	0.74	0.21
Mayo	0.79	0.18
Junio	0.81	0.21
Julio	0.60	0.12
Agosto	0.71	0.09
Septiembre	0.69	0.13

En la Figura 3, se observa que los valores de BC fueron menores en el mes de julio, de igual manera que el $\text{PM}_{2.5}$, ratificándose una mejor calidad del aire. Considerando que el BC se deriva de la combustión incompleta de combustibles fósiles, como el petróleo, se puede inferir que el excesivo tráfico vehicular por el transporte de la zona, estaría contribuyendo a su presencia en la atmósfera, como se puede observar en la misma figura. Es preciso indicar que, los muestreos realizados en fin de semana (marcador rojo), dieron los valores más bajos en las concentraciones de carbón negro, a excepción del 23 de abril, 21 de mayo y 03 de setiembre.

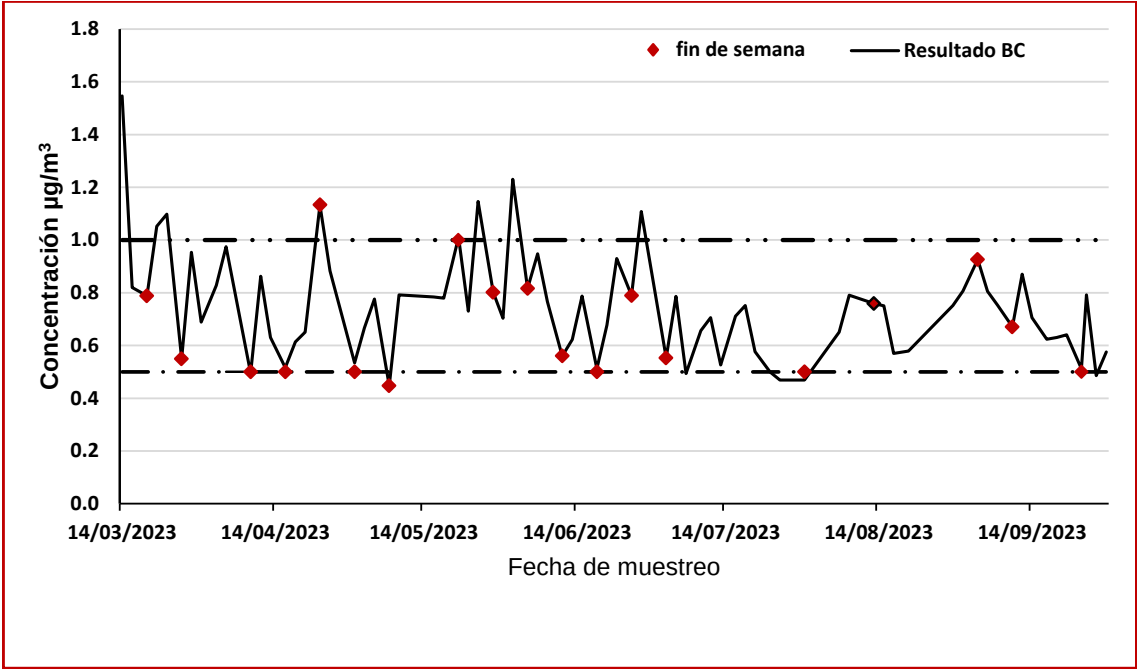


Figura 3. Resultados del carbono negro (BC) obtenidos en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM en Jesús María (marzo - septiembre 2023)

La estadística descriptiva de las concentraciones del carbono negro proveniente de la quema de biomasa (BCQ), se muestra en la tabla 5, el promedio mensual durante la campaña de muestreo en la tabla 6 y en la figura 4 se detalla la concentración determinada del BCQ en cada día de muestreo.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de BCQ en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM en Jesús María (14 de marzo – 29 de setiembre de 2023)

Especie	Promedio (µg/m³)	Mínimo (µg/m³)	Máximo (µg/m³)	s	Días muestreados
BCQ	0.02	0.0003	0.09	0.02	75

Tabla 6. Promedio Mensual y Desviación Estándar de las concentraciones del BCQ obtenidas en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM en Jesús María (marzo - setiembre 2023)

Meses	Promedio (µg/m³)	s
Marzo	0.006	0.010
Abril	0.010	0.017
Mayo	0.007	0.022
Junio	0.022	0.023
Julio	0.035	0.029
Agosto	0.001	0.002
Septiembre	0.020	0.023

La mayor concentración se ha producido en el mes de julio, seguido por junio y setiembre. La quema de biomasa incluye las quemas al aire libre de residuos sólidos y agrícolas, así como incendios forestales. El BC emitido de BCQ contiene mucho más carbono orgánico que carbono negro.

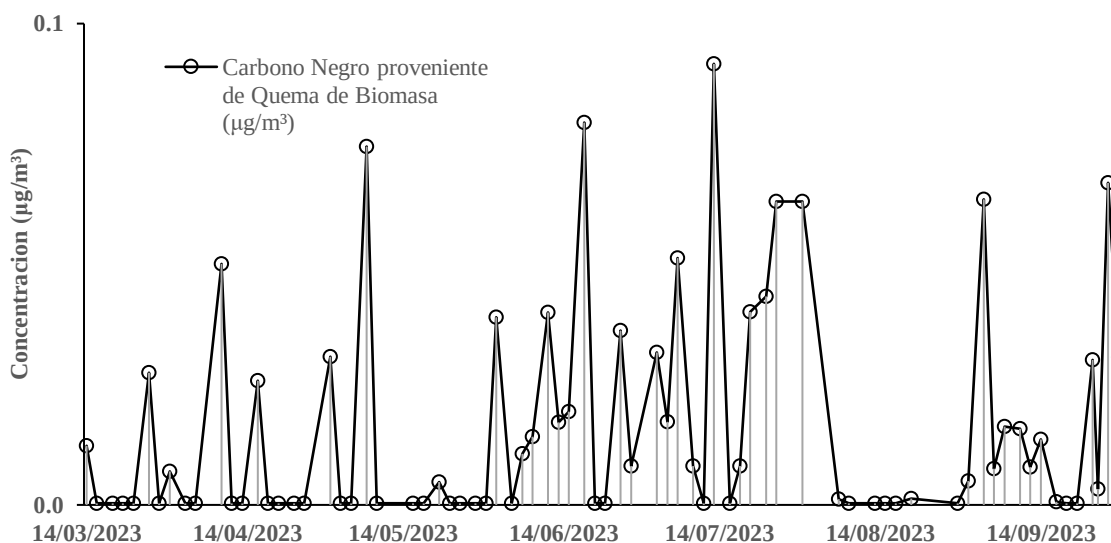


Figura 4. Concentraciones del BCQ obtenidos en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM en Jesús María (marzo - setiembre 2023)

Las fuentes de emisiones de BC varían según la zona en función del estilo de vida y los tipos de combustible utilizados. A escala mundial, las fuentes de combustión a pequeña escala representan el 65% de las emisiones totales, mientras que las actividades relacionadas con el transporte producen alrededor del 24% de las emisiones mundiales de BC ³⁵.

CONCLUSIONES

Setenta y cinco muestras de material particulado fueron evaluadas durante la campaña de muestreo realizada en la estación de monitoreo de calidad del aire CDM del SENAMHI en el distrito de Jesús María, zona urbana que conforma Lima Metropolitana. El resultado promedio de la concentración másica de $\text{PM}_{2.5}$ fue de $21.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ superando el valor recomendado por la OMS en la guía de calidad del aire 2021, de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El 21% de los resultados obtenidos durante el muestreo, cumplen con este límite recomendado, mientras que el 79% están por encima, mostrando una mala calidad del aire. Según los estándares de calidad ambiental del aire del Perú sólo el 4% de los resultados no cumplen con el valor recomendado por el Ministerio del Ambiente de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que demostraría buena calidad del aire durante los 6 meses que duró la evaluación.

Se ha detectado un promedio de $0.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de carbono negro (BC) con un valor máximo de $1.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimo de $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El 98% del BC proviene de la combustión incompleta de combustibles fósiles (combustión de gasolina, petróleo, fuentes industriales) y el 2% a la quema de biomasa (BCQ). Considerando el denso tráfico vehicular de la zona urbana evaluada, se puede atribuir a esta fuente como la causa de la

presencia de BC en la atmósfera, el cual podría estar contribuyendo al cambio climático y a posibles efectos negativos en la salud de la población.

Se realizarán evaluaciones posteriores utilizando modelos de dispersión de los contaminantes, con la finalidad de predecir cómo éstos se propagan y su distribución en el medio ambiente

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecemos al Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados – ProCiencia y al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. CONCYTEC, por el apoyo brindado para la ejecución de la evaluación de aerosoles atmosféricos en el distrito de Jesús María, a través del proyecto con contrato N° PE501080618-2022-PROCIENCIA, Tesis de Pregrado y Posgrado en Institutos Públicos de Investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. P. Avino, G. Capannesi, A. Rosada, *Microchemical Journal*, “Heavy metal determination in atmospheric particulate matter by Instrumental Neutron Activation Analysis”, **2008**, 97- 106
2. M. Pandolfi, Y. Gonzales-Castanedo, A. Alastuey, J. D. de la Rosa et al., “Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} at multiple sites in the strait of Gibraltar by PMF: impact of shipping emissions” *Environ Sci Pollut Res*, **2011**, 18:260-269
3. C. Theodosi, G. Grivas, P. Zampas, A. Chaloulakou, N. Mihalopoulos, “Mass and chemical composition of size-segregated aerosols (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀)”, *Atmos. Chem. Phys.*, **2011**, 11, 11895 – 11911
4. W. J. Shaughnessy, M. M. Venigalla, D. Trump, “Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population”, *Atmospheric Environment*, **2015**, 102-111
5. J. Siva, J. Rojas, M. Norabuena, C. Molina, R. A. Toro, M. A. Leiva-Guzmán, “Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Perú”, *Environ Monit Assess*, **2017**, 189-638
6. W. Li, L. Shao, W. Wang, H. Li, X. Wang, Y. Li, W. Li, T. Jones, D. Zhang, “Air Quality improvement in response to intensified control strategies in Beijing during 2013-2019”, *Science of the Total Environment*, **744** **2020**, 140776
7. P. Bedregal, M. Ubillús, C. Cáceres-Rivero, P. Olivera, R. Garay, et al., “Determination of atmospheric aerosol components in an urban area to evaluate the air quality and identify the sources of contamination”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **2023**, 332:3507-3514.
8. P. Brimblecombe, “Air composition & chemistry”, segunda edición Cambridge University Press, Great Britain, **1996**, 55
9. M.A. Sierra, M. Gómez Gallego, “Principios de Química Medioambiental”, Editorial Síntesis S.A, España, **2007**, 38-39
10. UTAH Department of Environmental Quality. (1 de Abril de 2024). Particulate Matter Overview. Obtenido de <https://deq.utah.gov/air-quality/particulate-matter-overview>

11. U.S. EPA. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, Dec 2009). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-08/139F, **2009**
12. Y. Zhang, Sh. Kang, Ch. Li, T. Gao, Zh. Cong, M. Sprenger, Y. Liu, X. Li, y colaboradores, "Characteristics of black carbón in snow from Laohugou No. 12 glacier on the northern Tibetan Plateau", *Science of the Total Environment* 607 - 608, **2017**, 1237 – 1249
13. Ö. Gustafsson, V. Ramanathan, "Convergence on climate warming by black carbon aerosols", *PNAS* **2016**, Vol. 113, No. 16, 4243-4245
14. A. Petzold, J.A. Ogren, M. Iribigien, P. Laj, S.-M. Li, U. Baltensperger et al., "Recommendations for reporting black carbon measurements", *Atmos. Chem. Phys.*, **2013**, 13, 8365- 8379
15. Ontario Ministry of the Environment. (Abril de 2012). Ontario's Ambient Air Quality Criteria. Obtenido de <https://www.airqualityontario.com/downloads/AmbientAirQualityCriteria.pdf>
16. Perú, Ministerio del Ambiente. (2019). Aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire (Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM). Lima: Diario Oficial El Peruano.
17. Dirección General de Salud Ambiental, DIGESA http://www.digesa.minsa.gob.pe/DCOVI/mapas/DIGESA_AIR_MR_CalidadAireAnual_LIMA.html
18. Perú, Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (s.f.). Red de Vigilancia Ambiental. Obtenido de <https://pifa.oefa.gob.pe/VigilanciaAmbiental/>
19. Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología del Perú. SENAMHI <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/colecciones/51679-vigilancia-de-la-calidad-del-aire-en-el-area-metropolitana-de-lima-y-callao>
20. Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente UNEP, Climate and Clean Air and Coalition, "Integrate Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone", **2011**.
21. Instituto Nacional de Estadística e Informática. INEI, "Situación de la población peruana 202. Una mirada de la diversidad étnica." Julio **2024**, p 14.
22. Asociación española de normalización y certificación, AENOR, UNE-EN 12345, "Método de medición gravimétrico normalizado para la determinación de la concentración másica PM₁₀ y PM_{2.5} de la materia particulada en suspensión" **2015**
23. M. Manohar, A. Atanacio, D. Button, D. Cohen, "MABI – A multi-wavelength absorption black carbon instrument for the measurement of line light absorbing carbon particles", *Atmospheric Pollution Research*, 12 **2021** 133-140
24. A. Rys, L. Samek, "Measurement report: Determination of Black Carbon concentration in PM_{2.5} fraction by Multi-wavelength absorption black carbon instrument (MABI)", *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2021**, doi.org/10.5194/acp-2021-766.
25. World Health Organization, "WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} y PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide", **2021**.
26. El Peruano, Normas legales, "Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para aire y establecen disposiciones complementarias" Decreto Supremo N° 0032, **2017** – MINAM

27. Instituto del Mar del Perú. (s.f.). *Índice Costero El Niño (ICEN)*. Obtenido de https://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=I01780903000000000000
28. Lagos, P. (1983). El rol de la temperatura superficial del mar y la subsidencia atmosférica en la descripción de la estructura térmica de la capa de inversión. Actas de la consulta de expertos para examinar los cambios en la abundancia y composición por especies de recursos de peces neríticos San José, Costa Rica. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
29. American Thoracic Society, "What constitutes and adverse health effects of air pollution?", American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, **2000**, 161: 665-673.
30. V. Tapia, K. Steenland, B. Vu, Y. Liu et al., "PM2.5 exposure on daily cardio-respiratory mortality in Lima Perú, from 2010 to 2016" Environmental Health: A Global Access Science Source, 19 (1) **2020** 1-7.
31. S. Achilleos, M.A., Kioumourtoglou, C.D, J. D. Schwartz et al, "Acute effects of fine particulate matter constituents on mortality: A systematic review and meta-regression analysis", Environment International, **2017**, 109, 89-100
32. Moon Joon Kim, "The effects of transboundary air pollution from China on ambient air quality in South Korea", Heliyon 5, **2019**, e02953.
33. C. Freitas, A. De León, W. Jüger, N. Gouveia, "Air pollution and its impacts on health in Vitória, Espírito Santo, Brazil", Revista de Saúde Pública, **2016**, 50, 4.
34. R.J. Delfino, D. L. Gillen, T. Tjoa, N. Staimer, et al., « Electrocardiographic ST-segment depression and exposure to traffic-related aerosols in elderly subjects with coronary artery disease". Environmental Health Perspectives, 119(2), **2011**, 196-20.
35. M. Ni, J. Huang, Sh. Lu, X. Li, J. Yan, K. Cen, "A review on black carbon emissions, worldwide and in China", Chemosphere 107, **2014**, 83-93.