BoSIR Bulletin of Sustainable and Interdisciplinary Resources

Bosir, 2025, vol. 1 (1), 19-38.

ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

Concentrations of particulate material (pm10) in the air quality of the city of Arequipa, Peru

Concentraciones de material particulado (PM10) en la calidad del aire de la ciudad de Arequipa, Perú

Rosario Nayhua-Gamarra[1*]; José Iannacone[1]

[1] Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú
* Autor correspondente: ranayhua@outlook.es

Rosario Nayhua-Gamarra: https://orcid.org/0009-0009-6628-7693
José Iannacone: https://orcid.org/0000-0003-3699-4732

ABSTRACT

The objective was to analyze the fluctuations in the concentrations of particulate matter (PM_{10}) that affect air quality in the city of Arequipa, Peru, during the period 2010-2021. The research was of an applied type, with a descriptive, correlational approach, non-experimental and longitudinal design. 2,512 records of PM_{10} concentrations from five monitoring stations were analyzed. It was found that the monthly variation of PM_{10} increases from the months of July (103.24 µg/m^3) to November (108.91 µg/m^3), with El Filtro being the station with the highest concentration (141.28 µg/m^3); At the seasonal level, a higher concentration is found in winter (104.87 µg/m^3) and spring (108.63 µg/m^3); At an annual level, the highest value occurs in 2013 (124.92 µg/m^3). The historical behavior of PM_{10} shows a slight downward trend in almost all stations. There is a negative correlation with precipitation and relative humidity. The air quality status is moderate (70.22%), good (18.15%), and unhealthy for sensitive groups (10.59%). Likewise, the percentage of annual exceedance was 86.43% with respect to the ECA (Environmental Quality Standard) (50 µg/m^3) and 99.48% of the GCA (Air Quality Guidelines) (15 µg/m^3). It is concluded that the air quality in the five districts of Arequipa is impacted by high levels of PM_{10}, which exceed the standards established by Peruvian and international regulations. It is suggested to implement appropriate environmental management policies in order to improve air quality conditions.

Keywords: air quality, atmospheric pollution, air quality index, particulate matter, meteorological variables.

RESUMEN

El objetivo fue analizar las fluctuaciones en las concentraciones de material particulado (PM10) que afectan la calidad del aire en la ciudad de Arequipa, Perú, durante el periodo 2010-2021. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque descriptivo, correlacional, diseño no experimental y longitudinal. Se analizaron 2 512 registros de concentraciones de PM10 de cinco estaciones de monitoreo. Se encontró que la variación mensual de PM10 se incrementa a partir de los meses de julio (103,24 µg/m3) a noviembre (108,91 µg/m3), siendo El Filtro la estación con mayor concentración (141,28 µg/m3); a nivel estacional se encuentra

mayor concentración en invierno (104,87 µg/m3) y primavera (108,63 µg/m3); a nivel anual el valor más alto se presenta en 2013 (124,92 µg/m3). El comportamiento histórico de PM10 muestra una tendencia descendente leve en casi todas las estaciones. Hay una correlación negativa con la precipitación y con la humedad relativa. El estado de calidad de aire es moderado (70,22%), bueno (18,15%), e insalubre para grupos sensibles (10,59%). Asimismo, el porcentaje de excedencia anual fue 86,43% con respecto al ECA (Estándar de calidad ambiental) (50 µg/m3) y del 99,48% de la GCA (Guías de calidad de aire) (15 µg/m3). Se concluye que la calidad del aire en los cinco distritos de Arequipa se ve impactada por niveles elevados de PM10, los cuales exceden los estándares establecidos por la normativa peruana e internacional. Se sugiere implementar políticas de gestión ambiental apropiadas con el fin de mejorar las condiciones de la calidad del aire.

Palabras clave: calidad de aire, contaminación atmosférica, índice de calidad de aire, material particulado, variables meteorológicas.

INTRODUCCIÓN

Los contaminantes atmosféricos que inciden en la calidad del aire son numerosos; no obstante, el material particulado (PM) emerge como el principal contaminante con un diámetro de 10 micras o menos, capaz de ser inhalado y depositarse en el sistema respiratorio (OMS, 2016b). Las principales fuentes de este contaminante incluyen quema de combustibles fósiles, el sistema de transporte, la incineración de residuos y cultivos, así como las plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan carbón (OMS, 2016b; Querol, 2018).

Los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos experimentan variaciones en el tiempo y el espacio debido a diversos factores. Estos incluyen condiciones meteorológicas que afectan la acumulación, dispersión y transporte de contaminantes, la composición química del aire, así como las características topográficas y geográficas que pueden alterar la velocidad y dirección del viento (Boldo, 2016; OMS, 2006a). Además, el crecimiento urbano e industrial, junto con el entorno físico natural, inciden en la calidad del aire de las grandes ciudades, dando lugar a concentraciones elevadas de contaminantes (PNUMA, 2011; Querol, 2018).

Además, varios estudios han señalado la conexión entre las condiciones meteorológicas y el transporte y dispersión de contaminantes liberados en la atmósfera (OMS, 2006a; Seinfel & Pandis, 2006; Zoras et al., 2006; Jassim & Coskuner, 2017; Pacheco et al., 2020). Por lo tanto, es de suma importancia tener en cuenta las condiciones meteorológicas en cualquier investigación sobre la calidad del aire, ya que estas desempeñan un papel fundamental en el comportamiento de la contaminación atmosférica (Oviedo & Barrios, 2017).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), considera que la ciudad de Lima en el Perú, es la segunda con mayor contaminación atmosférica en Latinoamérica. Además, estimó que las 4 239 muertes en el Perú se debieron a causa de alguna enfermedad relacionada a la contaminación del aire durante el 2012 (OMS, 2016a; Sánchez & Ordoñez, 2016). Igualmente, Arequipa está experimentando un empeoramiento en la calidad del aire debido a niveles elevados de PM10 que exceden los estándares establecidos para la calidad ambiental del aire. Esto suscita inquietud por los posibles efectos perjudiciales que pueda tener en la salud y el medio ambiente. Este fenómeno se atribuye al crecimiento del parque automotor, generando un aumento en el tráfico vehicular que origina el incremento de la emisión de los contaminantes al aire, así como a la quema de biomasa, el incremento de actividades comerciales, y a las características topográficas y geográficas que contribuyen a la contaminación atmosférica (Informe Nº 232-2020-GRA/GRS/GR-DESA; Madariaga, 2018).

El asma, la bronquitis y la neumonía son afecciones respiratorias que a la larga pueden deteriorar la calidad de vida cuando se está expuesto a altas concentraciones de contaminantes atmosféricos, como el PM10, de manera regular (Flores, 2017). Según un estudio realizado entre 2014 y 2018, el distrito de Arequipa presenta los mayores niveles de contaminación, seguido de Yura, Socabaya y Paucarpata. Esta investigación también encontró que las concentraciones de PM10 en el distrito de Arequipa superan el límite anual establecido por las normas de calidad del aire (Madariaga, 2018). Las principales fuentes de contaminación identificadas son el parque automotor (60%), las industrias (21%), los comercios (11%), los calderos industriales (7%) y los compuestos de clorofluorocarbono (CFC) presentes en aerosoles y ambientadores (1%) (Apaza, 2018).

En este contexto, considerando la importancia del PM10 como un contaminante significativo debido a sus impactos en la salud de la población de la ciudad de Arequipa, el objetivo principal de este estudio es evaluar la calidad del aire mediante el análisis del comportamiento histórico de las concentraciones de PM10 en el periodo comprendido entre 2010 y 2021. De esta manera, se busca hallar la relación con los parámetros meteorológicos y entender la tendencia de este contaminante a lo largo de los doce años y determinar el porcentaje de excedencia anual con respecto a la normativa peruana. Estos resultados se presentarán como herramienta fundamental para que las autoridades implementen políticas destinadas a mejorar la calidad del aire en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue de tipo aplicada, descriptiva, correlacional y de diseño no experimental y longitudinal (Hernández et al., 2014). Se analizaron los registros de las concentraciones de PM_{10} de cinco estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Arequipa, durante el período comprendido entre 2010 al 2021. En la Tabla 1, se muestra las características de las estaciones de monitoreo de la red de la calidad de aire de Arequipa.

Tabla 1. Características de la red de estaciones de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Arequipa, Perú.

Nº	Estación	Distrito	Coordenadas		Características
			X	Y	
E1	El Filtro	Arequipa	229877	8185882	Alto tránsito vehicular, gran actividad comercial y doméstica.
E2	Av. Kennedy	Paucarpata	232183	8182789	Alto tránsito vehicular, gran actividad comercial y doméstica, activad de la mediana y pequeña industria de carácter metal mecánico.
E3	Socabaya	Socabaya	229832	8180810	Alto tránsito vehicular, gran actividad comercial y activad de la pequeña industria de carácter metal mecánico.
E4	Cerro Verde	Uchumayo	220811	8179386	Alto tránsito vehicular, actividad comercial y actividad minera (Cerro Verde).
E5	Cono Norte	Yura	220061	8195468	Alto tránsito vehicular, gran actividad comercial, activad de la mediana y pequeña industria y cercanía con la fábrica de Cemento Yura.

Se creó una hoja de cálculo de Excel con datos sobre las concentraciones de PM_{10} y parámetros meteorológicos como humedad relativa, precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento. Posteriormente, estos datos fueron importados al software estadístico SPSS versión 25 para llevar a cabo el análisis estadístico descriptivo e inferencial correspondiente. Para evaluar el comportamiento histórico de las concentraciones de PM_{10} de

las cinco estaciones de la red de monitoreo durante el período 2010 al 2021, se calcularon los promedios mensuales, estacional (verano, otoño, invierno y primavera) y anual.

Para evaluar el estado de la calidad del aire de la ciudad de Arequipa de toda la red de monitoreo se utilizó el Índice de calidad del aire (ICA), el cual primero se calcula el índice parcial para PM_{10}, utilizando la fórmula:

$$\mathbf{Ip} = \frac{\mathbf{IHi - ILo}}{\mathbf{BPHi - BPLo}}(\mathbf{Cp - BPLo}) + \mathbf{ILo}$$

Donde Ip = el índice del contaminante p

Cp = la concentración truncada del contaminante p

BP_{Hi} = el punto de corte de concentración que es mayor o igual a Cp

BP_{Lo} = el punto de corte de concentración que es menor o igual a Cp

I_{Hi} = el valor de AQI correspondiente a BP_{Hi}

I_{Lo} = el valor de AQI correspondiente a BP_{Lo}

El valor que se reporta corresponde al mayor valor que se obtenga del cálculo de PM_{10}

Posteriormente, los resultados se comparan con los rangos del ICA de 0 a 500, que comprende seis categorías; Buena ($0 \leq ICA \leq 50$ se le asigna el color verde), Moderada ($51 \leq ICA \leq 100$ se le asigna el color amarillo), Insalubre para grupos sensibles ($101 \leq ICA \leq 150$ se le asigna el color anaranjado), Insalubre ($151 \leq ICA \leq 200$ se le asigna el color rojo), Muy Insalubre ($201 \leq ICA \leq 300$ se le asigna el color morado) y Peligroso ($301 \leq ICA \leq 500$ se le asigna el color marrón) (EPA, 2018).

Se realizó un análisis de correlación entre las concentraciones de PM_{10} y los cinco parámetros meteorológicos utilizando el coeficiente de correlación Rho de Spearman (r). Para evaluar la tendencia de la serie histórica de las concentraciones de PM_{10} de la ciudad de Arequipa se utilizó el promedio multianual de toda la red de monitoreo durante el período 2010 al 20201, y se generó una regresión lineal con su respectivo coeficiente de

determinación (R^2). Todos los cálculos se realizaron a través del programa estadístico SPSS versión 25.

Con el propósito de determinar el porcentaje de excedencia anual para PM_{10}, se calculó el promedio anual multianual de PM_{10} que supera el límite normativo anual del ECA (Estándar de calidad ambiental) de la normativa nacional del Perú que establece un máximo de 50 µg/m^3 y con la GCA (Guías de calidad de aire) (OMS, 2021) que establece un nivel máximo permitido de 15 µg/m^3, cuyo valor es más rígido comparado con la GCA del 2005 (20 µg/m^3), para evidenciar el exceso anual de ambas normas.

Aspectos éticos: La Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental de la Gerencia Regional de Salud Arequipa, Perú proporcionó toda la información sobre el PM_{10} y las variables meteorológicas como la temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento del período 2010 al 2021 de cinco estaciones: El Filtro, Cono Norte, Av. Kennedy, Socobaya y Cerro Verde. También se utilizaron datos de la estación meteorológica La Pampilla del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

RESULTADOS

Comportamiento histórico de las concentraciones de PM_{10} de las estaciones de monitoreo, período 2010 al 2021

En la Tabla 2, se puede observar que a partir del mes de julio a diciembre se produce un incremento de las concentraciones de PM_{10} que sobrepasan el valor de 100 µg/m^3, alcanzando la máxima concentración en el mes de octubre (110,90 µg/m^3), en comparación con los primeros seis meses del año cuyos valores se encuentra por debajo de 100 µg/m^3. Se observa que la estación El Filtro alcanza las máximas concentraciones de PM_{10} a lo largo de los meses en comparación con las demás estaciones, alcanzando el pico más alto en el mes de noviembre (141,28 µg/m^3), le sigue la estación Cono Norte. Mientras que las estaciones Av.

Kennedy, Socabaya y Cerro Verde presentan menores concentraciones de PM_{10} en comparación con las dos anteriores.

Tabla 2. Comportamiento mensual multianual del material particulado PM_{10} de las cinco estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Arequipa, Perú. DE = Desviación estándar.

	Comportamiento mensual multianual				El Filtro	Av. Kennedy	Socabaya	Cerro Verde	Cono Norte
Meses	Media	Mínimo	Máximo	DE	Media	Media	Media	Media	Media
Enero	89,08	14,55	314,98	52,41	101,71	88,36	73,42	71,51	123,90
Febrero	81,86	5,87	239,44	42,44	104,65	82,41	73,55	64,19	88,77
Marzo	78,75	17,21	219,18	43,43	109,21	73,01	70,52	61,07	79,26
Abril	79,96	2,74	271,63	42,14	114,62	77,16	70,49	56,08	82,40
Mayo	86,63	6,56	481,77	56,88	122,38	71,94	75,26	64,59	100,29
Junio	94,02	1,66	272,53	46,27	123,59	87,23	84,84	74,78	101,52
Julio	103,24	14,05	357,59	53,92	135,71	90,88	97,66	85,30	110,07
Agosto	102,52	15,15	236,54	44,93	142,61	96,60	91,18	84,25	108,06
Septiembre	108,12	19,93	287,54	47,66	137,90	98,93	99,86	89,42	117,82
Octubre	110,90	29,66	327,78	49,43	124,53	106,58	107,90	97,23	122,43
Noviembre	108,91	34,19	275,61	45,62	141,28	103,02	95,47	94,05	115,67
Diciembre	106,10	26,43	268,26	45,14	130,53	97,70	96,97	89,39	121,68

Las estaciones de invierno y primavera presentan las máximas concentraciones de PM_{10} con 104,87 µg/m^3 y 108,63 µg/m^3, respectivamente cuyos valores superan los 100 µg/m^3, mientras que las estaciones de verano y otoño tienen concentraciones menores cuyos valores están comprendidos entre 82,83 y 86,73 µg/m^3, respectivamente.

Se observa que todas las estaciones de la red de monitoreo presentan los valores máximos de PM_{10} en invierno y primavera, siendo la estación el Filtro la que alcanza las máximas concentraciones en primavera y en invierno, le sigue la estación Cono Norte en primavera y en invierno. Sin embargo, la estación Cerro Verde es la que presenta la menor concentración de PM_{10} en invierno y primavera (Tabla 3).

Tabla 3. Comportamiento estacional multianual de PM_{10} de las cinco estaciones de la red de monitoreo.

Estaciones	Concentraciones de Material particulado PM_{10} (µg/m^3)				
	El Filtro	Av. Kennedy	Socabaya	Cerro Verde	Cono Norte
	Media	Media	Media	Media	Media
Verano	105,50	80,53	72,46	65,40	94,29
Otoño	120,07	78,78	76,83	64,91	94,86
Invierno	138,39	95,56	96,56	86,60	112,18
Primavera	132,21	102,46	100,09	93,51	119,90

Se observa la máxima concentración de PM_{10} en el año 2013, y a partir del año 2014 empiezan a reducirse alcanzando la mínima concentración en el año 2020 y a partir del año 2021 se incrementa de forma leve (Tabla 4).

Tabla 4. Comportamiento anual multianual de PM_{10} de las cinco estaciones dela red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Arequipa, Perú.

Años	Concentraciones de Material particulado PM_{10} (µg/m^3)					
	anual multianual	El Filtro	Av. Kennedy	Socabaya	Cerro Verde	Cono Norte
	Media	Media	Media	Media	Media	Media
2010	84,93	101,85	SD	59,86	55,68	123,69
2011	101,40	140,71	83,11	84,22	74,57	123,30
2012	101,47	144,23	86,12	103,82	59,49	123,12
2013	124,92	178,26	105,69	105,05	108,03	132,93
2014	112,91	161,19	100,55	94,89	101,88	102,03
2015	100,93	123,65	102,84	89,32	79,43	110,68
2016	96,79	108,15	88,22	90,43	95,99	101,03
2017	80,74	104,96	83,12	73,62	68,30	76,04
2018	90,71	99,30	102,39	95,15	88,30	60,95
2019	89,83	125,45	90,06	90,70	80,95	67,06
2020	78,54	90,01	61,04	77,68	89,55	SD
2021	83,84	94,20	84,57	85,58	73,68	SD

SD: Sin datos

Se observa que todas las estaciones presentan valores de PM_{10} que sobrepasa el valor de 50 µg/m^3, alcanzando sus máximas concentraciones en el año 2013, posteriormente a partir del año 2014 empieza una reducción de las concentraciones de PM_{10}, alcanzando la máxima disminución en el año 2020, y a partir del año 2021 nuevamente empieza a incrementarse las concentraciones de PM_{10} de manera leve en algunas estaciones. Se observa que el número de días buenos se presentó en los meses de enero a mayo. Mientras que el mayor número de días moderados fue en el mes de noviembre con un 80,09% (177 días) y el mayor número de días insalubres para grupos sensibles fue en el mes de diciembre con un 16,59% (37 días); el máximo número de días insalubres fue en los meses de septiembre, octubre y enero, el resto de los días presentaron una calidad muy insalubre (2 días) y peligrosa un día en el mes de mayo (Tabla 5). Se nota que el mayor número de días buenos fue en las estaciones de verano con un 30,96% (183 días) y otoño con el 25,79% (155 días). Mientras que el mayor número de días moderados se presentó en las estaciones de primavera con el 77,07% (511 días) e invierno 74,73% (491 días). Además, los días insalubres para grupos sensibles fueron en primavera con el 14,48% (96 días) y en invierno con el 13,24% (87 días). Asimismo, los demás días presentaron una calidad insalubre, muy insalubre y un solo día llegó a presentar una calidad peligrosa. Se evidencia claramente que en el año 2020 la calidad del aire de la ciudad de Arequipa mejoró significativamente, presentando el mayor número de días buenos en un 33,33% (40 días), en comparación con el año 2019 que presentó 13,83% (26 días) y el resto de años a excepción del año 2010 (Tabla 5).

Tabla 5. Estado de Calidad del Aire mensual, estacional y anual multianual de las cinco estaciones del período 2010 al 2021 de la ciudad de Arequipa, Perú.

	Buena De 0 a 50		Moderada De 51 a 100		Insalubre para grupos sensibles De 101 a 150		Insalubre De 151 a 200		Muy insalubre De 201 a 300		Peligrosa De 301 a 500	
Meses	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**
Enero	**46**	26,90	**111**	64,91	**9**	5,26	**5**	2,92	**0**	0,00	0	0,00
Febrero	**69**	33,17	**125**	60,10	**14**	6,73	**0**	0,00	**0**	0,00	0	0,00
Marzo	**68**	32,08	**129**	60,85	**15**	7,08	**0**	0,00	**0**	0,00	0	0,00
Abril	**63**	30,88	**128**	62,75	**12**	5,88	**1**	0,49	**0**	0,00	0	0,00
Mayo	**60**	29,27	**126**	61,46	**17**	8,29	**0**	0,00	**1**	0,49	**1**	0,49
Junio	**32**	16,67	**143**	74,48	**16**	8,33	**1**	0,52	**0**	0,00	0	0,00
Julio	**28**	12,67	**161**	72,85	**28**	12,67	**3**	1,36	**1**	0,45	0	0,00
Agosto	**22**	11,64	**141**	74,60	**26**	13,76	**0**	0,00	**0**	0,00	0	0,00
Septiembre	**19**	7,69	**189**	76,52	**33**	13,36	**6**	2,43	**0**	0,00	0	0,00
Octubre	**18**	8,22	**166**	75,80	**30**	13,70	**5**	2,28	**0**	0,00	0	0,00
Noviembre	**14**	6,33	**177**	80,09	**29**	13,12	**1**	0,45	**0**	0,00	0	0,00
Diciembre	**17**	7,62	**168**	75,34	**37**	16,59	**1**	0,45	**0**	0,00	0	0,00
Estaciones del año	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**
Verano	**183**	30,96	**365**	61,76	**38**	6,43	**5**	0,85	**0**	0,00	**0**	0,00
Otoño	**155**	25,79	**397**	66,06	**45**	7,49	**2**	0,33	**1**	0,17	**1**	0,17
Invierno	**69**	10,50	**491**	74,73	**87**	13,24	**9**	1,37	**1**	0,15	**0**	0,00
Primavera	**49**	7,39	**511**	77,07	**96**	14,48	**7**	1,06	**0**	0,00	**0**	0,00
Años	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**
2010	**86**	38.05	**109**	48.23	**26**	11.50	**4**	1.77	**1**	0.44	**0**	0.00
2011	**36**	14.06	**184**	71.88	**30**	11.72	**5**	1.95	**0**	0.00	**1**	0.39
2012	**59**	21.93	**170**	63.20	**34**	12.64	**5**	1.86	**1**	0.37	**0**	0.00
2013	**17**	9.24	**116**	63.04	**46**	25.00	**5**	2.72	**0**	0.00	**0**	0.00
2014	**10**	4.98	**157**	78.11	**32**	15.92	**2**	1.00	**0**	0.00	**0**	0.00
2015	**30**	11.95	**194**	77.29	**26**	10.36	**1**	0.40	**0**	0.00	**0**	0.00
2016	**25**	9.62	**212**	81.54	**23**	8.85	**0**	0.00	**0**	0.00	**0**	0.00
2017	**70**	27.89	**172**	68.53	**9**	3.59	**0**	0.00	**0**	0.00	**0**	0.00
2018	**20**	12.12	**133**	80.61	**12**	7.27	**0**	0.00	**0**	0.00	**0**	0.00
2019	**26**	13.83	**148**	78.72	**14**	7.45	**0**	0.00	**0**	0.00	**0**	0.00
2020	**40**	33.33	**73**	60.83	**7**	5.83	**0**	0.00	**0**	0.00	**0**	0.00
2021	**37**	26.24	**96**	68.09	**7**	4.96	**1**	0.71	**0**	0.00	**0**	0.00
Estaciones	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**	**Nº Días**	**%**
El Filtro	**36**	7,35	**326**	66,53	**116**	23,67	**11**	2,24	**0**	0,00	**1**	0,20
Av. Kennedy	**92**	18,51	**379**	76,26	**25**	5,03	**1**	0,20	**0**	0,00	**0**	0,00
Socabaya	**105**	18,72	**425**	75,76	**29**	5,17	**2**	0,36	**0**	0,00	**0**	0,00
Cerro Verde	**156**	29,49	**344**	65,03	**28**	5,29	**1**	0,19	**0**	0,00	**0**	0,00
Cono Norte	**67**	15,40	**290**	66,67	**68**	15,63	**8**	1,84	**2**	0,46	**0**	0,00

El estado de calidad de aire de toda la ciudad de Arequipa de los 2 512 días evaluados sólo el 18,15% (456 días) presentan una calidad buena y el 70,22% (1 764 días) presenta una

calidad moderada, el resto de los días presentaron una calidad insalubre para grupos sensibles 10,59% (266 días), insalubre 0,92% (23 días), muy insalubre 0,08% (2 días) y peligrosa 0,04% (1 día) (Tabla 5). Las estaciones que presentaron el mayor número de días buenos fueron Cerro Verde 29,49% (156 días), le sigue Socabaya 18,72% (105 días) y Av. Kennedy 18,51% (92 días), mientras que la estación El Filtro presentó el menor número de días buenos 7,35% (36 días) en comparación con el resto de las estaciones (Tabla 5). Sin embargo, las estaciones que presentaron el mayor número de días con una calidad moderada fueron Socabaya y Av. Kennedy con 75,76% y 76,26% respectivamente. Sin embargo, las estaciones con mayor número de días insalubres para grupos sensibles fueron El Filtro 23,67% (116 días) y Cono Norte 15,63% (68 días), de igual manera presentaron el mayor número de días insalubres en relación a las demás estaciones y solo el Filtro presentó un día que corresponde a una calificación peligrosa en el mes de mayo del año 2011.

Finalmente, el estado de calidad de aire de toda la ciudad de Arequipa de los 2 512 días evaluados sólo el 18,15% (456 días) presentan una calidad buena y el 70,22% (1 764 días) presenta una calidad moderada, el resto de los días presentaron una calidad insalubre para grupos sensibles 10,59% (266 días), insalubre 0,92% (23 días), muy insalubre 0,08% (2 días) y peligrosa 0,04% (1 día).

Se muestra la variación mensual de las cinco variables meteorológicas (Tabla 6). Las máximas concentraciones de humedad relativa y de precipitación se presentan en los meses de febrero y marzo; la temperatura máxima en el mes de abril y la máxima velocidad del viento en enero y febrero en comparación con los demás meses. De igual manera se vio que a nivel estacional la humedad relativa y precipitación máxima se presenta en verano, la temperatura máxima en verano y otoño, y la máxima velocidad del viento en verano alcanzando 2,82 m/s en comparación con las demás estaciones. Finalmente, con respecto a la variación multianual se observa que los niveles altos de humedad relativa se presentan en los años 2012, 2013 y

2017, mientras que la precipitación más alta en el año 2020, la temperatura más alta se da en el año 2010 y la velocidad del viento más alta en el año 2017 y 2020.

Tabla 6. Comportamiento mensual de las variables meteorológicas período 2010 al 2021 de la ciudad de Arequipa, Perú.

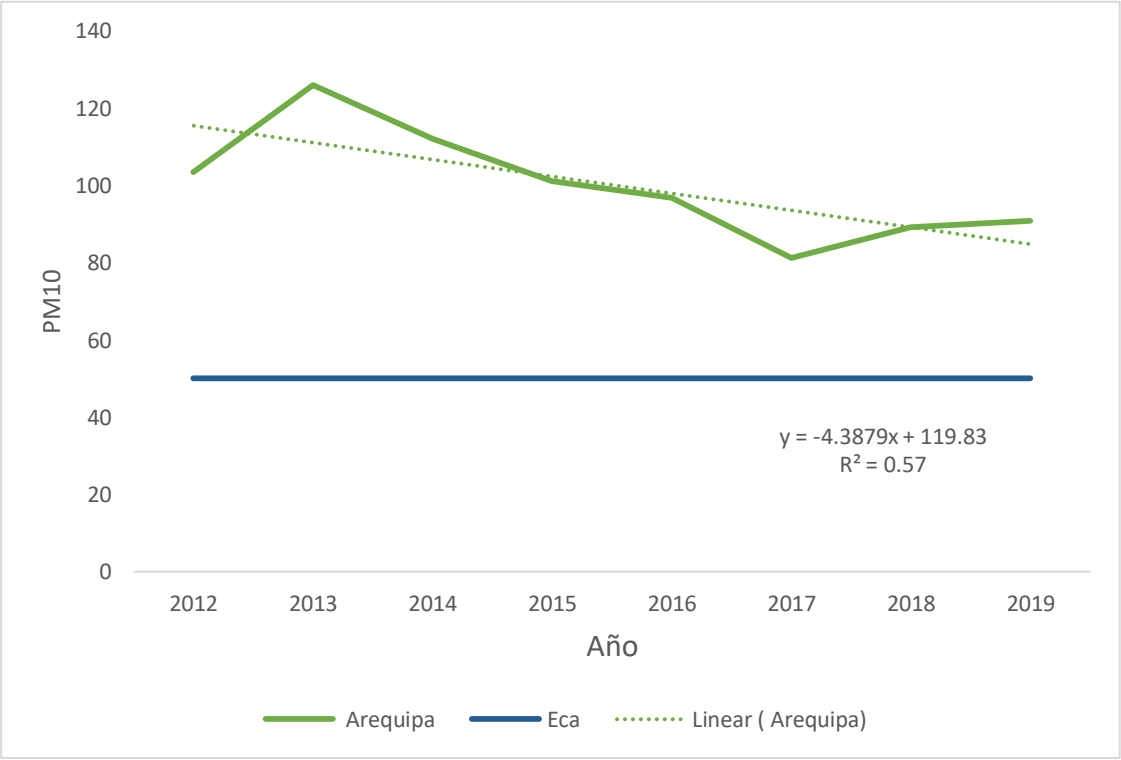
	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm/día)	Temperatura (ºC)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (º)
Mes	**Media**	**Media**	**Media**	**Media**	**Media**
Enero	76,78	0,72	15,10	5,01	93,91
Febrero	87,32	2,44	14,76	2,06	99,34
Marzo	80,66	0,97	15,66	1,83	102,73
Abril	71,70	0,00	16,08	0,94	102,14
Mayo	49,92	0,03	15,23	1,12	159,82
Junio	41,51	0,00	14,22	1,23	181,16
Julio	37,71	0,00	13,62	1,23	174,09
Agosto	38,31	0,00	14,73	1,22	167,42
Septiembre	42,82	0,00	14,51	1,01	186,53
Octubre	46,52	0,00	14,60	0,92	151,72
Noviembre	53,48	0,00	15,22	0,90	122,45
Diciembre	65,44	0,04	15,38	0,99	85,45
Estaciones del año					
Verano	81,85	1,40	15,19	2,82	99,04
Otoño	54,78	0,01	15,20	1,09	146,65
Invierno	39,96	0,00	14,27	1,14	177,48
Primavera	55,44	0,02	15,08	0,94	118,84
Año					
2010	48,85	0,09	16,92	1,79	103,67
2011	57,03	0,05	14,98	1,04	90,69
2012	65,97	0,38	13,30	0,72	189,17
2013	67,67	0,62	13,90	0,73	221,01
2014	39,64	0,00	21,24	2,22	36,63
2015	60,36	0,14	14,28	0,64	198,37
2016	61,21	0,10	14,33	0,81	96,23
2017	69,98	0,50	13,91	4,25	185,88
2018	65,38	0,27	13,89	0,40	175,67
2019	46,99	0,00	13,65	0,84	156,56
2020	55,65	3,03	13,56	3,38	95,94
2021	60,36	0,07	12,50	0,95	101,03

Se evidencia que las concentraciones de PM_{10} y la humedad relativa (r=-0,21; sig = 0,00) y la precipitación (r=-0,17; sig = 0,00) se asocian negativamente según el Rho de

Spearman. No se encontró correlación entre la PM_{10} con la Temperatura (ºC) (r=0,03; sig = 0,50), con la Velocidad del viento (m/s) (r=0,04; sig = 0,36) y con la Dirección del viento (º) (r=0,01; sig = 0,73). Para evaluar la tendencia de la serie histórica solo se consideró el período 2012 al 2019 debido a que las estaciones de Av. Kennedy, Cono Norte no cuentan con registros en los años 2010, 2019, 2020.

En la Figura 1, se observa una tendencia descendente de las concentraciones del PM_{10} de toda la red de monitoreo de la ciudad de Arequipa, y se aprecia que la regresión libneal exhibe una tendencia negativa, con por un R^2 de 0,57 relativamente alto.

Figura 1. Tendencia de la serie histórica de PM_{10} de la ciudad de Arequipa.



Se encontró que hay un porcentaje de excedencia anual del 86,43 %, es decir que las PM_{10} durante el período 2010 al 2021 superaron el valor límite de 50 $\mu g/m^3$ que establece ECA de la norma del Perú y solo el 13,57% no excede el valor anual. Asimismo, de acuerdo a la GCA de la OMS, hay un porcentaje de excedencia anual del 99,48%, es decir que las concentraciones de PM_{10} durante el período 2010 al 2021 superaron el valor límite de 15

$\mu g/m^3$ y solo el 0,52% no excede el valor anual. Asimismo, con respecto al porcentaje de excedencia anual de PM_{10} de las cinco estaciones de la red de monitoreo, se observa que la estación El Filtro presenta el mayor porcentaje de excedencia de la norma (94,49%), le siguen la estación Cono Norte (87,82%) y la estación Cerro Verde tiene el menor porcentaje de excedencia en comparación con las demás alcanzando (75,61%).

DISCUSIÓN

Se observó que existen diferencias con respecto a la variación mensual y estacional de las concentraciones de PM10, en toda la red de monitoreo de la calidad de aire de la ciudad de Arequipa, Perú. Estos resultados concuerdan con Chen (2019), quién encontró que las máximas concentraciones de PM10 ocurrían en invierno en comparación al verano. Se discrepa con Scapini (2020), cuyos resultados revelaron que durante el mes de octubre se registran las concentraciones más bajas de PM10 en comparación con los demás meses. Asimismo, divergimos de los resultados de Valdivia (2016), quien evidenció que las concentraciones de PM10 son más elevadas en las estaciones Villa María y Ate durante el verano y otoño, disminuyendo en los meses de invierno. Contrariamente, en las estaciones de San Borja, Campo de Marte y Callao, se presenta una situación opuesta, con valores máximos durante el invierno y valores mínimos en verano o primavera. Esta variación, puede estar influenciado por una serie de factores como el alto tránsito vehicular, calles sin pavimentar, actividades comerciales e industriales, condiciones meteorológicas, características geográficas y topográficas (Seinfeld & Pandis, 2006; Zoras et al., 2006; Boldo, 2016; Jassim & Coskuner, 2017; Madariaga, 2018; Pacheco et al., 2020).

Con respecto a la variación multianual de PM10 se encontró que la máxima concentración se presentó en el año 2013 con 124,92 µg/m3, los cuales fueron disminuyendo de manera irregular durante los años, logrando alcanzar los valores mínimos en el año 2020 (78,54 µg/m3). Estas reducciones se reflejan como consecuencia de las medidas tomadas en el Perú durante el confinamiento social obligatorio ante los primeros casos de COVID-19 registrados en marzo del 2020, donde se dictaron medidas como la reducción del trasporte

terrestre y fluvial en un 50%, reducción de las actividades económicas, comerciales e industriales, y éstas medidas permitieron de manera considerable la reducción de emisiones de contaminantes. Berman & Ebisu (2020), encontraron una reducción de los niveles de contaminantes durante el período COVID-19 en comparación con las concentraciones históricas. De igual modo Mahato et al. (2020) demostraron una reducción de los niveles de PM10 y PM2,5 en más del 50% en la ciudad de Delhi de la India; Xu et al. (2020) encontraron que los niveles de PM2,5, PM10, SO2, CO y NO2, fueron más bajos en el mes de febrero de 2020 en comparación con los niveles de febrero del 2017 al 2019 en las ciudades Wuhan, Jingmen y Enshi de China Central. Se ha encontrado una reducción de PM2.5 (62%), de PM10 (55%), NO2 (65%), y SO2 (82%) como consecuencia del reordenamiento de la Av. Abancay, Lima, Perú en comparación con la Av. Guillermo de La Fuente (Comas) y la Av. César Vallejo (El Agustino), Lima que no tuvieron reordenamiento vehicular (Tapia et al., 2018).

Asimismo, existen otras actividades que generan emisión de contaminantes que incrementan la contaminación del aire por PM10, como lo demuestra Conté & García-Gutiérrez (2019), quienes señalan que las plantas de trituración de piedra emiten un polvo sedimentable alrededor de 51 g por cada t de material procesado, de los cuales 19 g correspondían a la fracción respirable (diámetro menor de 10 □m). Rojano (2018) encontró que las altas concentraciones de PM10 se asocian principalmente con las actividades mineras generadas en los centros de explotación. Se ha encontrado un incremento diario de PM10 debido a fuentes de calefacción doméstica, calderas, hornos quemados con carbón o madera y chimeneas, los que originaron que la calidad del aire sea mala en la provincia de Silesia en Polonia (Kobza, 2018).

Con respecto al estado de Calidad de Aire de la ciudad de Arequipa a nivel mensual se encontró que el estado de calidad fue bueno, y se presentó en los meses de enero a mayo, de igual modo a nivel estacional se observó en verano y otoño, debido a que en estos meses las concentraciones de PM10 son menores en comparación con los demás meses del año. A nivel de toda la red de monitoreo se evidenció un estado de calidad buena en 456 días (18,15%), moderado 1764 días (70,22%) e insalubre para grupos sensibles 266 (10,59%), siendo las estaciones con mejor calidad de buena Cerro Verde y Socabaya. A nivel anual se evidenció claramente que en el año 2020 la ciudad de Arequipa presentó la mejor calidad del aire, presentando el mayor número de días buenos en un 33,33%, esto se debe a las medidas adoptadas por el confinamiento social obligatorio. Al examinar las variaciones en el índice de

calidad del aire y en las concentraciones de PM2.5, PM10, CO, SO2, NO2 y O3 durante el periodo de la pandemia de COVID-19 en el norte de China, observaron una mejora en la calidad del aire atribuible a la disminución de emisiones en el sector del transporte e industria secundaria (Wang et al., 2020). De igual manera se encontraron que los ICA fueron más bajos en el mes de febrero de 2020 en comparación con los niveles de febrero del 2017 al 2019 en las ciudades Wuhan, Jingmen y Enshi de China Central (Xu et al., 2020).

Asimismo, se demostró que las condiciones meteorológicas tienen relación con las concentraciones de PM10, y se encontró una correlación negativa con la humedad y la precipitación, lo cual significa que a medida que disminuyen los niveles de estos parámetros meteorológicos se incrementan las concentraciones de PM10 y viceversa, lo cual se evidenció en el comportamiento mensual estacional y anual de PM10 donde las máximas concentraciones se presentaron en invierno y primavera, que guardan relación con los niveles de la humedad relativa y precipitación, cuyos valores son menores a partir del mes de julio a noviembre, con el resto de las variables meteorológicas no se hallaron correlaciones. Una investigación halló una correlación negativa entre el PM10 con la humedad relativa y la precipitación, y también encontró una correlación positiva con la temperatura (Rojano, 2018). De igual manera se encontró variación estacional y anual entre las concentraciones diarias de PM y los parámetros meteorológicos; sin embargo, diferimos con respecto a la humedad relativa, puesto que sus hallazgos demostraron que existe una correlación positiva (Li, 2017).

De acuerdo con otros estudios se encontraron correlación con otras variables meteorológicas, según estudios de Gaitán et al. (2007) encontraron que la velocidad del viento ejerce una influencia inversa con los niveles de contaminación por material particulado, es decir cuando se incrementa la velocidad del viento la concentración de los contaminantes disminuye debido a la dispersión de las emisiones. Igualmente, Stafoggia et al. (2008) encontraron una relación directamente proporcional entre la temperatura y el material particulado, lo que significa que, a mayor temperatura, se incrementan las concentraciones de material particulado.

Con respecto a la tendencia de las concentraciones de PM10, se observa que hay una disminución leve en casi todas las estaciones de la red de monitoreo; sin embargo, sus valores siguen siendo superiores al valor límite de 50 µg/m3 establecido por el ECA anual que establece la norma peruana. Nuestros resultados coinciden con Valdivia (2016) quien mostró que existe una disminución moderada de los niveles de PM10 en casi todas las estaciones de monitoreo durante el período de estudio, sin embargo, los valores también eran superiores al

valor anual del ECA de la norma peruana, lo que se asocia al alto tránsito vehicular, calles sin pavimentar y a las condiciones meteorológicas. Asimismo, Kim (2018) encontró que las concentraciones de PM10, SO2, NO2, disminuyeron a partir del año 2000 en Corea, principalmente en el Área Metropolitana de Seúl donde se impusieron regulaciones mejoradas para las emisiones de PM10, y NO2 a los automóviles y a las grandes fuentes de emisión, cuyas tendencias se redujeron en los últimos años.

En relación con el nivel de exceso anual, se descubrió que las cantidades de PM10 sobrepasan el límite anual de 50 µg/m3, establecido por el ECA, en más del 86.43%. Además, superan el 98.93% de la GCA anual de la OMS, que fija el límite en 20 µg/m3, siendo significativamente más rigurosa para este contaminante. Este fenómeno se atribuye al aumento del parque automotor en Arequipa en los últimos años, lo que ha conducido a una congestión vehicular y, consecuentemente, a un aumento de las emisiones. Esta realidad también se refleja en los análisis realizados por Valdivia (2016), quien establece una asociación entre las elevadas emisiones vehiculares y el polvo atmosférico con el incremento de las concentraciones de PM10, superando los estándares de calidad ambiental del aire. De igual manera coincidimos con Apaza (2018) que establece que las concentraciones de PM10 superan el ECA debido al excesivo número de vehículos.

CONCLUSIONES

En el análisis realizado en las cinco estaciones de monitoreo de la ciudad de Arequipa, Perú, se ha constatado que las concentraciones de PM10 juegan un papel significativo en la calidad del aire a lo largo del periodo comprendido entre 2010 y 2021. Durante este lapso, se han observado niveles elevados de este contaminante, como se evidencia en el examen detallado a nivel mensual, estacional y multianual.

Con respecto al estado de calidad de aire de la ciudad de Arequipa durante el período 2010 al 2021, se ha encontrado el mayor porcentaje de la calidad buena y moderada en verano y otoño. A nivel anual se evidenció que en el año 2020 la ciudad de Arequipa presentó la mejor calidad del aire buena en un 33,33% y moderada en un 60,83%, debido a las medidas adoptadas por el confinamiento social obligatorio.

Asimismo, se ha constatado que las concentraciones de PM10 en la ciudad de Arequipa presentan correlación indirecta baja y muy baja con la precipitación y humedad relativa respectivamente. Está dinámica ha sido consistente en el período comprendido entre

2010 y 2021. Al observar las tendencias en las series históricas de PM10, se advierte una tendencia general hacia la disminución leve de las concentraciones en prácticamente todas las estaciones de monitoreo de la red de Vigilancia de la Calidad del Aire de la ciudad de Arequipa, Perú.

Con respecto al porcentaje de excedencia anual de PM10 en el periodo comprendido entre 2010 y 2021, las cinco estaciones de monitoreo han registrado mediciones que exceden el límite anual establecido para PM10 en más del 86,43%, este hecho subraya una preocupante falta de cumplimiento con los estándares de calidad ambiental (ECA) para el aire, los cuales son definidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y detallados en el D. S. Nº 003-2017-MINAM.

REFERÊNCIAS

Apaza, R. (2018). *Impacto de la contaminación ambiental en la salud de la población de Arequipa Metropolitana en el periodo 2013 - 2017* [Tesis para optar el título profesional de Economista]. Universidad Nacional de San Agustín. Repositorio Institucional. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6824

Berman, J. D., & Ebisu, K. (2020). Changes in US air pollution during the COVID-19 pandemic. *Science of the total environment*, *739*, 139864. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720333842

Boldo, E. (2016). *La contaminación del aire*. Instituto de Salud Carlos III (ISCIII).

Chen, S., Cui, K., Yu, T.Y., Chao, H.R., Hsu, Y.C., Lu, I.C., Arcega, R.D., Tsai, M.H., Lin, S.L., Chao, W.C., Chen, C., & Yu, K.L.J. (2019). A big data analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} from low cost air quality sensors near traffic areas. *Aerosol and Air Quality Research*, *19*(8), 1721-1733. https://aaqr.org/articles/aaqr-19-06-oa-0328.pdf

Flores, M. (2017). *La Contaminación Ambiental: su impacto en la salud de la población de Arequipa Metropolitana 2016-2017* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5867

Conté, C., & García-Gutiérrez, J. A. (2019). Cálculo de emisión de polvo en plantas de trituración de piedra. *Avances*, *21*(2), 179-192. https://www.redalyc.org/journal/6378/637869113004/637869113004.pdf

Doria, R. & Porras, T. (2017). *Distribución Temporal de la Fracción Respirable PM10 y la Correlación con las Variables Meteorológicas en la Universidad de la Costa, CUC.* https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/216/Distribuci%c3%b3n%20Temporal%20de%20la%20Fracci%c3%b3n%20Respirable%20PM10%20y%20la%20Correlaci%c3%b3n%20con%20las%20Variables%20Meteorol%c3%b3.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de ingeniería*, *26*, 81-92.

Gerencia Regional de Salud Arequipa – Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental. (2022). *Informe Monitoreo de la calidad del aire Nº 232-2020-GRA/GRS/GR-DESA.*

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. 6ª Ed. Mcgraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. DE C.V.

Jassim, M.S., & Coskuner, G. (2017). Assessment of spatial variations of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) in Bahrain identified by air quality index (AQI). *Arabian Journal of Geosciences, 10* (19), 1-14. https://www.researchgate.net/profile/Gulnur-Coskuner-2/publication/312034290_Assessment_of_spatial_variations_of_particulate_matter_PM10_and_PM25_in_Bahrain_identified_by_air_quality_index_AQI/links/5a4dc522458515a6bc6e1d48/Assessment-of-spatial-variations-of-particulate-matter-PM10-and-PM25-in-Bahrain-identified-by-air-quality-index-AQI.pdf

Kim, J., Ghim, Y. S., Han, J. S., Park, S. M., Shin, H. J., Lee, S. B., Ghim, Y. S., Kim, J., & Lee, G. (2018). Long-term trend analysis of Korean air quality and its implication to current air quality policy on ozone and PM 10. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34*(1), 1-15. https://koreascience.kr/article/JAKO201810748278998.pdf

Kobza, J., Geremek, M., & Dul, L. (2018). Characteristics of air quality and sources affecting high levels of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Poland, Upper Silesia urban area. *Environmental Monitoring and Assessment, 190* (515), 1-13. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6797-x

Li, X., Ma, Y., Wang Y., Liu N., & Hong Y. (2017). Temporal and spatial analyses of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) and its relationship with meteorological parameters over an urban city in northeast China. *Atmospheric Research, 198*, 185-193. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809516303180

Mahato, S., Pal, S., & Ghosh, K. G. (2020). Effect of lockdown amid COVID-19 pandemic on air quality of the megacity Delhi, India. *Science of the total environment, 730*, 139086. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7189867/pdf/main.pdf

Madariaga, Z. (2018). *Estudio de Concentración de Carbono Negro (BC) y Carbono Orgánico (OC) contenido en el Material Particulado menor a 10 micrometros (PM_{10}) y su incidencia en la salud de la población de Arequipa Metropolitana - años 2014, 2015, 2016, 2017, y 2018* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de San Agustín. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8051

OMS (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Actualización mundial 2005 (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02). Organización Mundial de la Salud. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/W?sequence=1

OMS (2016a). *Calidad del aire Ambiente*. https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire/calidad-aire-ambiente

Pacheco, P. R., Parodi, M. C., Mera, E. M., & Salini, G. A. (2020). Variables meteorológicas y niveles de concentración de material particulado de 10 µm en Andacollo, Chile: un estudio de dispersión y entropías. *Información Tecnolológica, 31* (6), 171-182. https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v31n6/0718-0764-infotec-31-06-171.pdf

PNUMA (2011). *Seguimiento a nuestro medio ambiente en transformación: de Río a Río+20 (1992-2012)*. División de Evaluación y Alerta Temprana (DEWA), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Nairobi. pp. 2-39, 53-55, 84-86.

Querol, X. (2018). *La calidad del aire en las ciudades un reto mundial*. 1ra edición, Fundación Gas Natural Fenosa. https://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2018/06/calidad-del-aire-reto-mundial.pdf

Rojano, R. E., Arregoces, H. A., Angulo, L. C., & Restrepo, G. M. (2018). Análisis y Origen de las Concentraciones de TSP y PM_{10} en Minería de Carbón a Cielo Abierto usando Gráficos Polares. *Información Tecnológica, 29*(6), 131-142. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000600131

Sánchez, O., & Ordoñez, C. (2016). *Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2015*. SENAHMI.

https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/126/Evaluaci%c3%b3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire%20en%20Lima%20Metropolitana%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Seinfeld, J.H., & Pandis S.N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change.* John Wiley y Sons.

Stafoggia, M., Schwartz, J., Forastiere, F., & Perucci, C. A. (2008). Does temperature modify the association between air pollution and mortality? A multicity case-crossover analysis in Italy. *American journal of epidemiology*, *167*(12), 1476-1485. https://academic.oup.com/aje/article/167/12/1476/88667?login=false

Tapia, V., Carbajal, L., Vásquez, V., Espinoza, R., Vásquez-Velásquez, C., Steenland, K., & Gonzales, G. F. (2018). Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2, 5 y 10), dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, *35*, 190-197. https://www.scielosp.org/article/ssm/content/raw/?resource_ssm_path=/media/assets/rpmesp/v35n2/1726-4642-rpmesp-35-02-190.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. (2018). Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). Office of Air Quality Planning and Standards. https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf

Valdivia, S. A. P. (2016). Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana. *Anales Científicos*, *77* (2), 273-283. https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/699/pdf_37

Wang, Y., Yuan, Y., Wang, Q., Liu, C., Zhi, Q., & Cao, J. (2020). Changes in air quality related to the control of coronavirus in China: Implications for traffic and industrial emissions. *Science of the Total Environment*, *731*, 139133. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7202850/

Xu, K., Cui, K., Young, L. H., Hsieh, Y. K., Wang, Y. F., Zhang, J., & Wan, S. (2020). Impact of the COVID-19 event on air quality in central China. *Aerosol and Air Quality Research*, *20*(5), 915-929. https://aaqr.org/articles/aaqr-20-04-oa-0150.pdf

Zoras, S., Triantafyllou, A.G., & Deligiorgi, D. (2006). Atmospheric stability and PM10 concentrations at far distance from elevated point sources in complex terrain: Worst-case episode study. *Journal of environmental management*, *80*(4), 295–302. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479705003154.

Recibida Enero, 2025.
Aceptada Marzo, 2025.