



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO**

**LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y SU INFLUENCIA EN LA CALIDAD  
DEL AIRE AMBIENTAL POR PM2.5 DE LIMA METROPOLITANA EN EL AÑO  
2017**

**Línea de investigación:**

**Física nuclear y ambiental**

Tesis para optar el grado académico de Maestra en Gestión Ambiental

**Autor:**

Loayza Ríos, Doris Raquel

**Asesor:**

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

(ORCID: ORCID- 0000-0001-6930-5601)

**Jurado:**

Mayhuasca Guerra, Jorge Víctor

Marín Machuca, Olegario

Mendoza García, José Tomas

**Lima - Perú**

**2023**



## Reporte de Análisis de Similitud

Archivo:

Fecha del Análisis:

Analizado por:

Correo del analista:

Porcentaje:

Título:

Enlace:



DRA. MIRIAM LILIANA FLORES CORONADO  
JEFA DE GRADOS Y GESTIÓN DEL EGRESADO



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO**

**“LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y SU INFLUENCIA EN LA CALIDAD DEL  
AIRE AMBIENTAL POR PM2.5 DE LIMA METROPOLITANA EN EL AÑO 2017”**

**Línea de investigación:  
Física nuclear y ambiental**

Tesis para optar el Grado Académico de Maestra en Gestión Ambiental

**Autor:**

Loayza Ríos, Doris Raquel

**Asesor:**

Zambrano Cabanillas, Abel Walter  
(ORCID Código 0000-0001-6930-5601)

**Jurado:**

Mayhuasca Guerra, Jorge Víctor  
Marín Machuca Olegario  
Mendoza García, José Tomas

Lima - Perú

2023

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mis Padres René, Raquel y  
mi hermano Fernando

A mi esposo Gonzalo, mis hijos Rodrigo y  
Andrea

A mis hermanas Yoni y Rosario

Que de alguna manera han contribuido en mis  
logros profesionales

## **AGRADECIMIENTO**

A mi asesor Dr. Zambrano Cabanillas Abel  
Walter

Al Servicio Nacional de Meteorología e  
Hidrología del Perú por brindarme su apoyo

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
RESUMEN .....	x
ABSTRACT .....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	12
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Descripción del problema .....	14
1.3 Formulación del problema.....	15
1.4 Antecedentes .....	16
1.5 Justificación de la investigación .....	19
1.6 Limitaciones de la Investigación .....	20
1.7 Objetivos .....	20
1.8 Hipótesis.....	21
II. MARCO TEÓRICO .....	22
2.1 Marco conceptual .....	22
III. METODO .....	29
3.1 Tipo de Investigación .....	29
3.2 Población y muestra.....	29
3.3 Operacionalización de variables .....	31
3.4 Instrumentos .....	31
3.5 Procedimientos .....	31
3.6 Análisis de datos.....	32
IV. RESULTADOS .....	33
4.1 Variación temporal y espacial diaria de las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> con los Estándares Nacionales de Calidad de Aire.....	33
4.2 Comportamiento Temporal y Espacial de las Variables Meteorológicas .....	43
4.3 Variación diaria de los Vientos locales predominantes y la relación con la concentración de PM <sub>2,5</sub> en Lima Metropolitana en el año 2017. Así mismo, las condiciones sinópticas predominantes. ....	65
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	85

VI.	CONCLUSIONES .....	88
VII.	RECOMENDACIONES.....	89
VIII.	REFERENCIAS .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ubicación de las estaciones automáticas de calidad del aire y meteorológica del SENAMHI-LM</i>	13
Figura 2 <i>Comparaciones de tamaños para partículas</i>	23
Figura 3 <i>Factores que determinan el clima en el Perú</i>	26
Figura 4 <i>Mapa de ubicación de las estaciones automáticas de calidad del aire y meteorológica en LM</i>	30
Figura 5 <i>Concentraciones diarias de <math>PM_{2.5}</math> en la estación del distrito de ATE en el año 2017</i>	34
Figura 6	35
Figura 7 <i>Concentraciones diarias de <math>PM_{2.5}</math> en la estación del Campo de Marte en el año 2017</i>	36
Figura 8 <i>Concentraciones diarias de <math>PM_{2.5}</math> en la estación del distrito de Santa Anita en el año 2017</i>	37
Figura 9 <i>Concentraciones diarias de <math>PM_{2.5}</math> en la estación del distrito de Villa María en el año 2017</i>	38
Figura 10 <i>Concentraciones diarias de <math>PM_{2.5}</math> en la estación del distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2017</i>	39
Figura 11 <i>Concentraciones diarias de <math>PM_{2.5}</math> en la estación del distrito de San Martín de Porres en el año 2017</i>	40
Figura 12 <i>Concentraciones diarias de <math>PM_{2.5}</math> en la estación del distrito de Puente Piedra en el año 2017</i>	41
Figura 13 <i>Concentraciones diarias de <math>PM_{2.5}</math> en la estación del distrito Huachipa en el año 2017</i>	42
Figura 14 <i>Promedios diarios del <math>PM_{2.5}</math> de las estaciones y su relación con los estándares de calidad de aire</i>	43
Figura 15 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la velocidad del viento en ATE</i>	44
Figura 16 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la temperatura del aire en ATE</i>	44
Figura 17 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la humedad relativa en ATE</i>	45
Figura 18 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la velocidad del viento en San Borja</i>	46
Figura 19 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la temperatura del aire en San Borja</i>	47
Figura 20 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la humedad relativa en San Borja</i>	48
Figura 21 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la velocidad del viento en Campo de Marte</i>	49
Figura 22 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la temperatura del aire en Campo de Marte</i>	49
Figura 23 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la humedad relativa en Campo de Marte</i>	50
Figura 24 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la velocidad del viento en Sta. Anita</i>	51
Figura 25 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la temperatura del aire en Sta. Anita</i>	51
Figura 26 <i>Promedios decadales de <math>PM_{2.5}</math> y su comportamiento con la humedad relativa en Sta. Anita</i>	52
Figura 27 <i>Variación estacional de la concentración por <math>PM_{2.5}</math> en cada estación</i>	54
Figura 28 <i>Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración <math>PM_{2.5}</math> en el Distrito de Ate</i>	55
Figura 29 <i>Curva de relación entre la humedad relativa y concentración <math>PM_{2.5}</math> en el Distrito de Ate</i>	56
Figura 30 <i>Curva de relación entre la temperatura y concentración <math>PM_{2.5}</math> en el Distrito de Ate</i>	56
Figura 31 <i>Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración <math>PM_{2.5}</math> en el Distrito de San Borja</i>	57
Figura 32 <i>Curva de relación entre la humedad relativa y concentración <math>PM_{2.5}</math> en el Distrito de San Borja</i>	57
Figura 33 <i>Curva de relación entre la temperatura y concentración <math>PM_{2.5}</math> en el Distrito de San Borja</i>	58
Figura 34 <i>Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración <math>PM_{2.5}</math> en el Distrito de Jesús María</i>	58
Figura 35 <i>Curva de relación entre la humedad relativa y concentración <math>PM_{2.5}</math> en el Distrito de Jesús</i>	



<i>María</i> .....	59
Figura 36 <i>Curva de relación entre la temperatura y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de Jesús María</i> ..	59
Figura 37 <i>Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de Santa Anita</i> .....	60
Figura 38 <i>Curva de relación entre la humedad relativa y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de Santa Anita</i> .....	60
Figura 39 <i>Curva de relación entre la temperatura y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de Santa Anita</i> ..	61
Figura 40 <i>Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de Villa María del Triunfo</i> .....	61
Figura 41 <i>Curva de relación entre la humedad relativa y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de Villa María del Triunfo</i> .....	62
Figura 42 <i>Curva de relación entre la temperatura y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de Villa María del Triunfo</i> .....	62
Figura 43 <i>Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de San Juan de Lurigancho</i> .....	63
Figura 44 <i>Curva de relación entre la humedad relativa y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de San Juan de Lurigancho</i> .....	63
Figura 45 <i>Curva de relación entre la temperatura y concentración PM<sub>2.5</sub> en el Distrito de San Juan de Lurigancho</i> .....	64
Figura 46 <i>Curva de relación entre la probabilidad de ocurrencia de material particulado PM<sub>2.5</sub> y la concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	64
Figura 47 <i>Vientos frecuentes en ATE el día 13 de junio con una concentración de 83 µg/m<sup>3</sup></i> .....	66
Figura 48 <i>Vientos frecuentes en ATE el día 14 de junio con una concentración de 76 µg/m<sup>3</sup></i> .....	66
Figura 49 <i>Vientos frecuentes en ATE el día 22 de agosto con una concentración de 70,1 µg/m<sup>3</sup></i> .....	67
Figura 50 <i>Vientos frecuentes en SBJ el día 22 de agosto con una concentración de 34,8 µg/m<sup>3</sup></i> .....	67
Figura 51 <i>Vientos frecuentes en CDM el día 18 de setiembre con una concentración de 35,1 µg/m<sup>3</sup></i> .....	68
Figura 52 <i>Vientos frecuentes en STA el día 22 de agosto con una concentración de 61,7 µg/m<sup>3</sup></i> .....	69
Figura 53 <i>Vientos frecuentes en VMT el día 18 de setiembre con una concentración de 53,3 µg/m<sup>3</sup></i> .....	70
Figura 54 <i>Vientos frecuentes en HCH el día 13 de junio con una concentración de 74,7µg/m<sup>3</sup></i> .....	70
Figura 55.....	71
Figura 56 <i>Vientos frecuentes en SJL el día 13 de junio con una concentración de 54,2 µg/m<sup>3</sup></i> .....	72
Figura 57 <i>Vientos frecuentes en SJL el día 14 de junio con una concentración de 59,0 µg/m<sup>3</sup></i> .....	72
Figura 58 <i>Vientos frecuentes en SJL el día 22 de agosto con una concentración de 61,9 µg/m<sup>3</sup></i> .....	73
Figura 59 <i>Vientos frecuentes en SMP el día 22 de agosto con una concentración de 36,1µg/m<sup>3</sup></i> .....	73
Figura 60 <i>Vientos frecuentes en PPD el día 14 de junio con una concentración de 43 µg/m<sup>3</sup></i> .....	74
Figura 61 <i>Vientos frecuentes en PPD el día 22 de agosto con una concentración de 49,9 µg/m<sup>3</sup></i> .....	75
Figura 62 <i>Ubicación del APS, antes y durante del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	76
Figura 63 <i>Ubicación del APS, durante los días con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	76
Figura 64 <i>Ubicación del APS, después del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	76
Figura 65 <i>Líneas de corriente a nivel 850 hPa, antes y durante del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	77
Figura 66 <i>Líneas de corriente a nivel 850 hPa, durante los días con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	77
Figura 67 <i>Líneas de corriente a nivel 850 hPa, después del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	78
Figura 68 <i>Líneas de corriente a nivel 500 hPa, antes y durante del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	78
Figura 69 <i>Líneas de corriente a nivel 500 hPa, durante los días con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	79
Figura 70 <i>Líneas de corriente a nivel 500 hPa, después del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	79
Figura 71 <i>Líneas de corriente a nivel 200 hPa, antes y durante del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	80
Figura 72 <i>Líneas de corriente a nivel 200 hPa, durante los días con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	80
Figura 73 <i>Líneas de corriente a nivel 200 hPa, después del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	81
Figura 74 <i>Ubicación del APS, antes y durante del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	81
Figura 75 <i>Líneas de corriente a nivel 850 hPa, durante los días con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	82
Figura 76 <i>Líneas de corriente a nivel 500 hPa, durante y después del día con mayor concentración PM<sub>2.5</sub></i> .....	82

.....	82
Figura 77 <i>Líneas de corriente a nivel 200 hPa, antes y durante del día con mayor concentración <math>PM_{2.5}</math></i>	83
Figura 78 <i>Ubicación del APS, Líneas de corriente a nivel 850, 500 y 200 hPa año 2018, antes del día con mayor concentración <math>PM_{2.5}</math></i> .....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Estándares Nacionales de Calidad de Aire del MINAM</i> .....	24
Tabla 2 <i>Estándares de Material Particulado OMS_2005</i> .....	25
Tabla 3 <i>Ubicación Geográfica de las Estaciones de Calidad de Aire y Meteorológicas en LM</i> .....	30
Tabla 4 <i>Promedio estacional de las concentraciones <math>PM_{2,5}</math> en las estaciones de Lima Metropolitana</i> .....	53
Tabla 5 <i>Concentraciones mayores de <math>PM_{2,5}</math> y la relación con la dirección viento en el año 2017</i> .....	87

## RESUMEN

La presente tesis titulada “Las condiciones meteorológicas y su influencia en la calidad del aire ambiental por  $PM_{2.5}$  de Lima Metropolitana el año 2017” analizó la relación entre los cambios diarios del estado del tiempo, la variación de los contaminantes de la calidad de aire atmosférico por  $PM_{2.5}$  y la situación sinóptica predominante, cuyo objetivo fue evaluar la influencia de las condiciones meteorológicas en la calidad del aire ambiental por  $PM_{2.5}$  de Lima metropolitana el año 2017, en nueve distritos de Lima Metropolitana, donde el SENAMHI tiene estaciones que monitorean (24h) los contaminantes y variables meteorológicas. Se analizó la variación temporal y espacial diaria de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  con los estándares nacionales de calidad de Aire y el comportamiento temporal y espacial de las variables meteorológicas. A su vez, se planteó la regresión lineal múltiple para cada estación y se obtuvo las ecuaciones lineales de las variables meteorológicas como independiente, el contaminante  $PM_{2.5}$  como dependiente, y los coeficientes de correlación. El análisis permitió identificar de manera general como las variables meteorológicas influyen en forma diferente en cada una de las estaciones. La mayor concentración de  $PM_{2.5}$  se presentó en las estaciones de otoño e invierno. La relación entre la concentración de  $PM_{2.5}$  con viento y temperatura del aire son inversamente proporcional y directamente proporcional con la humedad relativa. A partir de estos resultados se concluyó que las variables meteorológicas y los contaminantes de  $PM_{2.5}$  tienen una influencia significativa en la distribución espacial y temporal.

Palabras clave: Análisis de regresión lineal múltiple, calidad de aire,  $PM_{2.5}$ , sinóptica, variable meteorológica.

## ABSTRACT

This thesis entitled “The meteorological conditions and their influence on the ambient air quality by  $PM_{2.5}$  of Metropolitan Lima in 2017” analyzed the relationship between the daily changes of the weather, the variation of air quality pollutants atmospheric by  $PM_{2.5}$  and the predominant synoptic situation, whose objective was to evaluate the influence of weather conditions on the environmental air quality by  $PM_{2.5}$  of metropolitan Lima in 2017, in nine (9) districts of Metropolitan Lima, where the SENAMHI has stations that monitor (24h) pollutants and meteorological variables. The daily temporal and spatial variation of  $PM_{2.5}$  concentrations was analyzed with the national air quality standards and the temporal and spatial behavior of the meteorological variables. In turn, the multiple linear regression for each station was raised and the linear equations of the meteorological variables were obtained as independent, the  $PM_{2.5}$  contaminant as dependent, and the correlation coefficients. The analysis allowed to identify in a general way how the meteorological variables influence each one of the stations differently. The highest concentration of  $PM_{2.5}$  occurred in the autumn and winter seasons. The relationship between the concentration of  $PM_{2.5}$  with wind and air temperature are inversely proportional and directly proportional to the relative humidity. From these results it was concluded that meteorological variables and  $PM_{2.5}$  pollutants have a significant influence on the spatial and temporal distribution.

Keywords: Air quality, meteorological variable, multiple linear regression analysis,  $PM_{2.5}$ , Synoptic.

## I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la influencia del medio ambiente sobre la salud ha adquirido en las últimas décadas una relevancia creciente gracias a los avances de la Biometeorología humana, ciencia de carácter interdisciplinar (...). Actualmente, además de la influencia que las diferentes variables meteorológicas presentan sobre la morbilidad y mortalidad, los episodios de altos niveles de concentración de contaminantes atmosféricos también han sido objeto de numerosos estudios (Monsalve, 2011). La exposición a los contaminantes causa graves deterioros al medio ambiente y la salud (enfermedades respiratorias y cardiovasculares), limitadas especialmente por las condiciones meteorológicas.

Las entidades regulatorias ambientales estandarizan los niveles máximos permisibles de concentración para cada uno de los contaminantes de acuerdo al entorno climático y sus factores. Las normas de calidad del aire en el mundo están siendo cada vez más exigentes y tienen mayor similitud a nivel global (OMS, 2005). Realizó un estudio de comparación de las distintas regiones en el mundo, concluyendo que Asia y Latinoamérica tienen concentraciones mayores de  $PM_{10}$  que Europa y Norteamérica debiéndose principalmente a su crecimiento en producción industrial y el uso de combustibles de baja calidad.

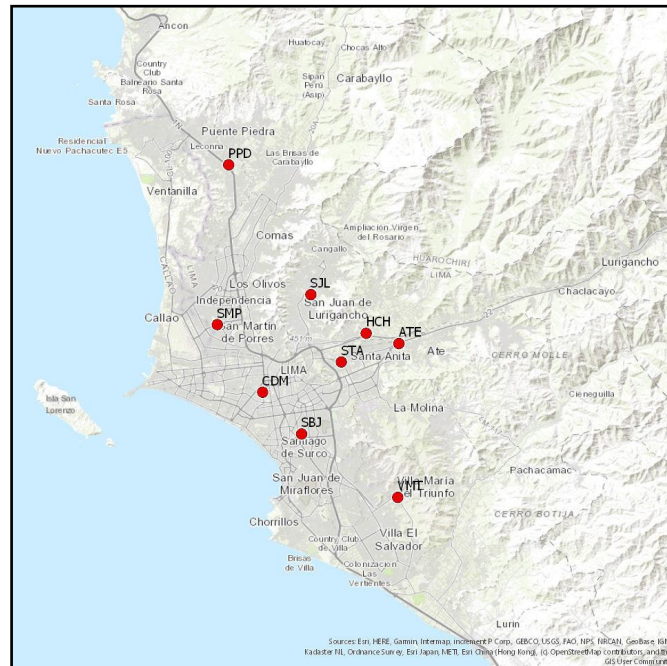
El  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  provienen tanto de fuentes móviles por el uso de combustibles fósiles, como de fuentes fijas y fuentes naturales; las primeras son las que contribuyen en un mayor porcentaje en las áreas urbanas (...). El impacto en la salud del material particulado está ampliamente documentado y se asocia principalmente con mortalidad prematura de causa cardiovascular y respiratoria, cáncer pulmonar e incremento de admisiones hospitalarias por asma y otras enfermedades respiratorias. (Ministerio del Ambiente, 2013)

Hoy en día, los estudios demuestran que los contaminantes como el Material Particulado en el aire, están causando serios problemas en la salud de la población. Por esta razón, en este estudio de investigación se examinó la relación de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y las variables meteorológicas.

El objetivo fue de analizar el comportamiento de las condiciones meteorológicas y su influencia en la calidad del aire ambiental por  $PM_{2.5}$  de Lima Metropolitana en el año 2017. En la investigación se utilizó información de las estaciones automáticas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), ubicadas dentro de la red de calidad del aire en el ámbito de Lima Metropolitana (LM), ver Figura 1.

### Figura 1

*Ubicación de las estaciones automáticas de calidad del aire y meteorológica del SENAMHI-LM*



*Nota.* Elaboración propia.

## 1.1 Planteamiento del problema

La creciente necesidad por disminuir el impacto que tienen los contaminantes

atmosféricos en el ambiente y en la salud pública, hacen que se generen y desarrollen estudios con el fin de entender el comportamiento de estos contaminantes. Por los problemas que inducen, existen varios métodos para su análisis.

Se ha determinado en múltiples estudios que el material particulado igual o menor a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ ) llamado también fracción respirable es aquel que penetra a las vías respiratorias inferiores. Esta investigación realizó toma de información horaria del material particulado  $PM_{2.5}$  durante 12 meses en nueve distritos de Lima Metropolitana, en el objetivo de determinar la concentración temporal y su influencia por las condiciones meteorológicas.

El notable deterioro de la calidad del aire ambiental en Lima tiene una relación directa con las enfermedades respiratorias y cardíacas, lo que genera una creciente preocupación por parte de las autoridades ambientales y de salud pública. A pesar de los esfuerzos realizados en años recientes, el problema de la contaminación atmosférica es cada vez más severo.

La presente investigación relacionó las condiciones meteorológicas y su efecto sobre la concentración del  $PM_{2.5}$ , con el fin de plasmar estrategias de manera oportuna para tomar decisiones a favor de la salud.

## **1.2 Descripción del problema**

La Organización Mundial de la Salud estima que "alrededor de 7 millones de personas mueren cada año por la exposición a partículas finas en el aire que penetra profundamente en los pulmones y el sistema cardiovascular, causando enfermedades como accidentes cerebrovasculares, enfermedades cardíacas, cáncer de pulmón, enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones respiratorias, incluida la neumonía". (Organización Panamericana de la Salud, 2018)

La OMS, muestra que las partículas finas en el aire atmosférico causan enfermedades al



cerebro, corazón y pulmones.

La Organización Mundial de la Salud estima que “más del 90% de las muertes relacionadas con la contaminación del aire ocurren en países de ingresos bajos y medios, principalmente en Asia y África, seguidos por países de ingresos bajos y medios de las regiones del Mediterráneo Oriental, Europa y América” (Organización Panamericana de la Salud, 2018).

La OMS, muestra que más del 90% de las muertes relacionadas con la contaminación del aire se dan en países de ingresos bajos y medios.

Las altas concentraciones de las emisiones registradas guardan relación con el comportamiento de las variables meteorológicas dentro del tiempo atmosférico (estaciones, meses, días).

Lima es la ciudad más industrializada del país, con un gran parque automotor, diferentes microclimas, más de 10 millones de habitantes, y caracterizándose por su elevada y constante humedad atmosférica; esta condición favorece a la formación de nubes bajas (neblina, niebla y estratos) y la concentración de contaminantes; siendo esto menos adverso si ocurriera incremento de viento o un cielo despejado durante el día.

### **1.3 Formulación del problema**

#### **- Problema general**

¿En qué medida las condiciones meteorológicas influyen en la calidad del aire ambiental por  $PM_{2.5}$  en Lima metropolitana en el año 2017?

#### **- Problemas específicos**

¿En qué medida la variación temporal y espacial diaria de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en Lima Metropolitana en el año 2017 contrastan con los Estándares Nacionales de Calidad de Aire en Lima Metropolitana?

¿En qué medida la concentración de  $PM_{2.5}$  se relaciona con las variables meteorológicas de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento en Lima Metropolitana?

¿Cómo la influencia de los vientos locales predominantes y los sistemas sinópticos inciden en el comportamiento de la concentración de  $PM_{2.5}$  en Lima Metropolitana?

#### **1.4 Antecedentes**

Peñate et.al. (2008) manifiestan que “la variabilidad interanual y estacional de las intrusiones de polvo en dos áreas geográficamente distintas pero que coinciden en su proximidad a regiones desérticas, se ha ampliado el conocimiento de la climatología relacionada con este fenómeno” (p.33).

Esta investigación mostró que la circulación atmosférica a escala sinóptica, son las responsables de las incursiones de polvo del África al este de Estados Unidos. Estos aportes más las emisiones locales, podría tener implicaciones significativas con respecto a la calidad del aire regional.

Garreaud y Rutllant (2006) manifiestan que “la cuenca de Santiago, durante los meses de invierno en la circulación atmosférica sobre esta región exhibe una significativa variabilidad interdiaria, asociada al paso de ondas en la tropósfera media y alta que se desplazan de oeste a este” (p.6).

La investigación también consideró que las perturbaciones atmosféricas de escala sinóptica influyen en los factores meteorológicos de escala local en Chile central.

Sierra (2006) concluye que “la asociación que existe entre algunas variables meteorológicas como la temperatura, vientos y lluvias con una variable de calidad del aire  $PM_{10}$ , relacionar cuales son las fuentes de emisión y las variables meteorológicas que contribuyen a las concentraciones de  $PM_{10}$ ” (p.8).

La investigación consideró que el contaminante de calidad del aire que presenta mayores concentraciones en la atmósfera es el  $PM_{10}$ , también es responsables de las enfermedades respiratorias en la ciudad.

Adani et al. (2018) menciona que “la diferencia de las concentraciones se debe a la reducción de emisiones en lugar más que a los cambios en las condiciones meteorológicas. Además de reducción, la distribución espacial y temporal de emisiones, los flujos juegan un papel clave en la predicción de la concentración” (p.3).

La investigación mostró que los patrones de concentración de las diferentes emisiones causan impacto a escala local y los cambios lo trae la escala sinóptica.

Ballester y Tenías (1999) concluyen que “los estudios epidemiológicos, usan series temporales para medir los efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica. Los factores importantes son las variaciones estacionales, semanales y las variables meteorológicas en enfermedades estacionales, como la gripe” (p.109).

La investigación consideró a las series temporales como las más utilizadas para evaluar los efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica se relaciona con los factores meteorológicos y van desde un aumento de la mortalidad, por causas respiratorias, cardiovasculares a las alteraciones del funcionalismo pulmonar y otros síntomas.

Silva y Montoya (2004) escribieron que “El comportamiento de los contaminantes sólidos sedimentables (polvo atmosférico) está sujeto a las variaciones estacionales. Así, en verano la máxima y en invierno la mínima; estaciones de transición la tendencia respectiva, mínimos en abril y los máximos en noviembre” (p. 7).

El estudio evaluó las condiciones meteorológicas para el año 2004 y el polvo atmosférico como contaminante información de la estación automática del Aeropuerto Internacional Jorge

Chávez, incluyendo el radio sondaje.

“La variación de la concentración de los contaminantes en una zona, no solo dependen de los contaminantes del lugar, sino además los que emanan de otros lugares y son transportados por el viento” (Silva y Montoya, 2004, p. 7)

Sánchez (2011) concluyó que “las condiciones meteorológicas y la presencia de fuentes contaminantes son factores determinantes en la distribución del aire. Si sumamos las actividades propias como: intenso tránsito de vehículos pesados, actividades industriales, la concentración de contaminantes incrementa” (p.58).

El estudio consideró que la fuente principal de contaminantes para Lima Metropolitana es la combustión vehicular.

Sánchez y Ordóñez (2016) manifestaron que “mayor concentración  $PM_{2.5}$  en agosto Ate 40,6 y STA 32,7 ( $\mu g/m^3$ ), HCH 35 y SJL 34 ( $\mu g/m^3$ ) abril. Las mínimas en enero SJL 20,7 y STA 18,5  $\mu g/m^3$ , Ate 29,6  $\mu g/m^3$  marzo y HCH 16,1  $\mu g/m^3$  en noviembre” (p.40).

El estudio consideró la concentración del material particulado  $PM_{2.5}$  en LM en la zona norte, sur y este en periodo mensual, concluyó que la concentración de  $PM_{2.5}$  se diferencia.

Ramos et al. (2010) concluyeron que “La concentración de los contaminantes en la atmósfera se afecta por variables meteorológicas como, la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, que controlan la velocidad que se realizan las reacciones químicas atmosféricas” (p.65).

El estudio propone funciones de regresión múltiple para describir la concentración de los contaminantes atmosféricos en función de las variables meteorológicas.

Ramos et al. (2010) manifiestan que “humedad relativa y  $PM_{10}$  tienen correlación inversa ( $r = 0,749$ ), mayor en temporada sin lluvias. Variables meteorológicas y contaminantes presentan

buena asociación mensual (0.373 a 0,772). Las variables mejores descriptoras de concentración mensual: temperatura, humedad relativa y dirección de vientos” (p.76).

Martín et al. (2012) manifiestan que “los patrones meteorológicos derivados de la circulación general, permiten identificar situaciones sinópticas que incidirán, junto a las características locales de los estados del tiempo diarios, en la capacidad de influir positiva o negativamente en la salud de las personas” (p.2).

Arrieta (2016) escribe que “La velocidad y dirección del viento se consideran como las variables meteorológicas con efecto directo en dispersión de los contaminantes del aire. La dispersión de contaminantes en la atmósfera depende del viento, la dirección del mismo y turbulencia del aire” (p.52).

### **1.5 Justificación de la investigación**

Las medidas de control de contaminación atmosférica que han sido implementadas hasta el momento, son mínimas comparándolas con el incremento de emisiones que resultan del crecimiento económico de la ciudad.

Con respecto a la base científica del problema, se consideró de información y medición meteorológica, mediciones de la calidad del aire e inventarios de emisiones. Cada uno de estos temas permitió recopilar desarrollos intelectuales y aprovechar las investigaciones académicas a nivel global, como la composición del material particulado, el conocimiento meteorológico (sinóptico, meso y micro escala) y manejo de los datos meteorológicos.

En este contexto, las ciudades deben analizar las conexiones entre la contaminación atmosférica del aire urbano con el ámbito, regional y global ambiental, cuando hay evidencia del desplazamiento de los contaminantes de una cuenca atmosférica a otra. La aplicación de la meteorología al problema relacionado con la salud humana es una importante dirección de

investigación, destacando la necesidad de aplicar los conocimientos adquiridos a la comunidad médica, e intercambiar información relevante entre la meteorología y la salud humana.

Esta investigación permitió desarrollar y diseñar boletines o avisos de alerta sanitaria a partir de pronósticos biometeorológicos, para alertar oportunamente sobre su ocurrencia a las autoridades e instituciones de salud, lo que permitió adoptar medidas preventivas que minimicen los riesgos de letalidad para la vida humana.

### **1.6. Limitaciones de la Investigación**

Información meteorológica, la inconsistencia de los registros de la información diaria en algunas estaciones. Esta falta de información fue completada por procedimientos estadísticos.

La información de  $PM_{2.5}$ , la falta de datos diarios en algunas de las estaciones. Esta falta de información fue completada por procedimientos estadísticos.

### **1.7. Objetivos**

#### **Objetivo general**

Evaluar la influencia de las condiciones meteorológicas en la calidad del aire ambiental por  $PM_{2.5}$  de Lima metropolitana en el año 2017.

#### **Objetivos específicos**

- Analizar la variación temporal y espacial diaria de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de Lima Metropolitana en el año 2017 y realizar análisis comparativo en conjunto con el Estándares Nacionales de Calidad de Aire.
- Evaluar la concentración de  $PM_{2.5}$  y su relación con las variables meteorológicas de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento.
- Analizar la influencia de los vientos locales predominantes y los sistemas sinópticos en el comportamiento de la concentración de  $PM_{2.5}$ .

## **1.8 Hipótesis**

Para la prueba de hipótesis se planteó si las condiciones meteorológicas influyen en la calidad del aire ambiental por  $PM_{2.5}$  de Lima Metropolitana en el año 2017.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Marco conceptual

#### 2.1.1 *Material particulado atmosférico (PM)*

PM, significa material particulado (contaminación por partículas): el término para una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín, o el humo, son las grandes y oscuras como para verlas a simple vista. Otras son pequeñas que solo pueden detectarse mediante el uso de un microscopio electrónico (EPA, 2017).

El material particulado es uno de los contaminantes atmosféricos más estudiados en el mundo, este se define como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera que se originan a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas. (Arciniégas, 2012)

Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa por unidad de volumen de aire en microgramo por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

#### 2.1.2 *Material particulado menor a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ )*

Son partículas inhalables finas que tienen diámetros por lo general de 2,5 micrómetros o menores, ver Figura 2. En promedio el cabello humano mide, aproximadamente, 70 micrómetros de diámetro, lo que hace 30 veces más grande que la partícula fina más grande.

La mayoría de las partículas se forman en la atmósfera como resultado de reacciones complejas de químicos, como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, que son contaminantes emitidos por centrales eléctricas, industrias y automóviles (EPA, 2017)



## Figura 2

### Comparaciones de tamaños para partículas



Nota. Tomado de EPA, 2017.

### 2.1.3 Calidad del aire

La calidad del aire trata de la composición del aire y se expresa mediante la concentración o intensidad de contaminantes. La variación está relacionada a diversos factores, como el tipo de relieve (factor físico), reacciones químicas de los contaminantes en la atmósfera, dispersión (factores químicos y meteorológicos), usos y costumbres de la población (factores sociales), actividades económicas y el aprovechamiento de la tecnología (factores económicos y tecnológicos).

El aire siempre ha tenido cierto grado de contaminación, debido a los fenómenos naturales, sin embargo, cuando se habla de la contaminación del aire, nos referimos a lo generado por la actividad del hombre, que alteran la salud y el bienestar de las personas, ver Tabla 1.

**Tabla 1***Estándares Nacionales de Calidad de Aire del MINAM*

Parámetros	Periodo	Valor	Criterios de evaluación	Método de análisis
Material particulado con diámetro menor a 2.5 micras (PM <sub>2.5</sub> )	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial / filtración
	Anual	25	Media aritmética anual	(Gravimetría)

*Nota.* NE: No exceder, microgramos por metro cúbico en condiciones estándar (25°C y atmósfera), Elaboración propia.

**2.1.4 Estándares de calidad del aire**

Es la medida que considera los niveles de concentración máxima de contaminantes del aire, que su condición de cuerpo receptor es recomendable no exceder para evitar riesgo a la salud humana. (OPS, 2016)

Estándares primarios:

Aquellos que se establecen para proteger la salud pública. Se basan principalmente en las concentraciones máximas de los contaminantes que no significan riesgo para la población ni a los grupos sensibles, tales como asmáticos, niños y ancianos.

Estándares secundarios:

Estándares que protegen el bienestar público, que comprende principalmente la protección de la flora, fauna, cultivos, de las construcciones y contra el deterioro de la visibilidad.

A continuación, se presentan los estándares nacionales e internacionales de calidad de aire ambiental para los parámetros de PM<sub>2.5</sub>, ver Tabla 2.

**Tabla 2***Estándares de Material Particulado OMS\_2005*

Parámetros	Periodo	Valor	Criterios de evaluación
Material	24 horas	25	Media de 24 horas
Particulado con diámetro menor a 2.5 micras (PM <sub>2.5</sub> )	Anual	10	Media anual

*Nota.* NE: No exceder, microgramos por metro cúbico en condiciones estándar (25°C y atmósfera), Elaboración propia.

La OMS recomienda para el ECA de PM<sub>2.5</sub> valores promedio de 24 horas un valor de 25 ug/m<sup>3</sup>. (OMS, 2015)

Además, la OMS da como valor guía para el MP<sub>2.5</sub> en exposiciones prolongadas se eligió una concentración anual media de 10 ug/m<sup>3</sup>. En el estudio de la Sociedad Americana del Cáncer (ACS) (Pope III et al., 2002), este valor representa el extremo inferior de la gama en la que se observaron efectos significativos en la supervivencia. La adopción de una guía en este nivel concede un valor importante a los estudios de exposición prolongada que utilizan los datos de la ACS y los de Harvard de seis ciudades. En todos estos estudios se notificaron asociaciones estrechas entre la exposición prolongada al PM<sub>2.5</sub> y la mortalidad.

### **2.1.5 Biometeorología**

Es la ciencia interdisciplinaria que estudia los efectos del clima y el tiempo sobre los seres vivos, los mecanismos de adaptación de éstos y las consecuencias de los impactos naturales y antrópicos sobre la atmósfera. Los efectos del clima y el tiempo sobre los seres vivos son conocidos desde los tiempos de Hipócrates; pero debido a múltiples causas, sólo en los últimos decenios la ciencia biometeorológica ha podido jugar el papel significativo que hoy tiene como puente de unión entre los profesionales de la meteorología, la climatología, la medicina humana

y veterinaria, la epidemiología, la geografía, la agronomía, la ecología, la biología y muchas otras ciencias que intervienen en este amplio campo interdisciplinario. (Lecha, 2015)

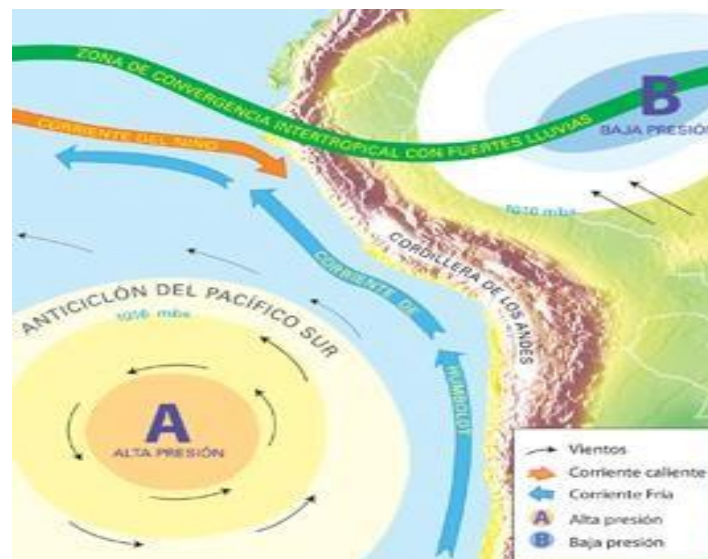
### 2.1.6 Anticiclón del Pacífico Sur

Son altas presiones, con circulación de vientos (anti horario) de sur a norte, que recogen la humedad existente y la llevan a la costa, ver Figura 3 donde se condensan en forma de nubes estratiformes y persistentes de mayo a octubre.

“Cuando se intensifica el anticiclón, entonces tenemos un mayor afloramiento, temperaturas menores y en algunos casos, cuando esos extremos, tenemos un anti niño. Cuando los vientos se debilitan, tienen menos fuerza y hay un desplazamiento de este centro anticiclónico hacia el sur oeste, entonces estamos ante la presencia de un Fenómeno de El Niño”. (Montesinos y Aceituno, 2003).

### Figura 3

Factores que determinan el clima en el Perú



Nota. Tomado de OLPC Resources, s.f.

### 2.1.7 Escala Sinóptica

Aemet (2018) menciona que “escala meteorológica que corresponde con las dimensiones

de las ondas baroclinas en altura y las borrascas y los anticiclones de superficie. Corresponde a la macroescala-beta de la clasificación de Orlanski, con dimensión espacial del orden de unos pocos miles de km y temporal del orden de unos pocos días”.

#### **2.1.8 Vaguada**

Agencia Estatal de Meteorología (2018) “región de la atmosfera en la cual la presión es baja con respecto a las regiones próximas en el mismo nivel. Se presenta en un mapa sinóptico por un sistema de isobaras o de isohipsas casi paralelas y en forma aproximadamente de “V”, cuya concavidad está dirigida hacia las bajas presiones”.

#### **2.1.9 Anticiclón**

Agencia Estatal de Meteorología (2018), “región de la atmosfera en donde la presión es más elevada que la de sus alrededores para el mismo nivel. El aire desciende hacia el interior de los anticiclones, lo que se conoce como subsidencia, y fluye hacia afuera desde ellos. La presión más alta se localiza siempre en el centro”.

#### **2.1.10 Viento**

Rodríguez et al. (2004), comenta que “consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra. Existen diversas causas que pueden provocar la existencia del viento, pero normalmente se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura”.

#### **2.1.11 Vientos locales**

Rodríguez et al. (2004), escribe que “se denominan así los vientos que se producen sólo en determinadas zonas, a menudo consecuencia de las características geográficas y orográficas del lugar”.

### **2.1.12 *Inversión térmica***

Agencia Estatal de Meteorología (2018), “es un fenómeno consistente en un aumento de la temperatura del aire con la altitud, es decir, conforme asciende en una capa de la atmósfera encontramos temperaturas cada vez más altas. Se llama “inversión” porque lo habitual es lo contrario: que la temperatura descienda con la altitud”.

### **2.1.13 *Estabilidad atmosférica***

AEMET (2018), “se dice que existe equilibrio estable en un punto, cuando, al aplicar un pequeño desplazamiento a una partícula de aire infinitesimal situada en dicho punto, aparecen fuerzas aplicadas a la partícula que tienen a devolverla a su estado inicial”.

### III. MÉTODO

#### 3.1 Tipo de Investigación

Por el tipo de investigación, el presente estudio reunió las condiciones metodológicas según la planificación de toma de datos, de una investigación retrospectiva, en razón, que los datos ya están registrados y son observacionales.

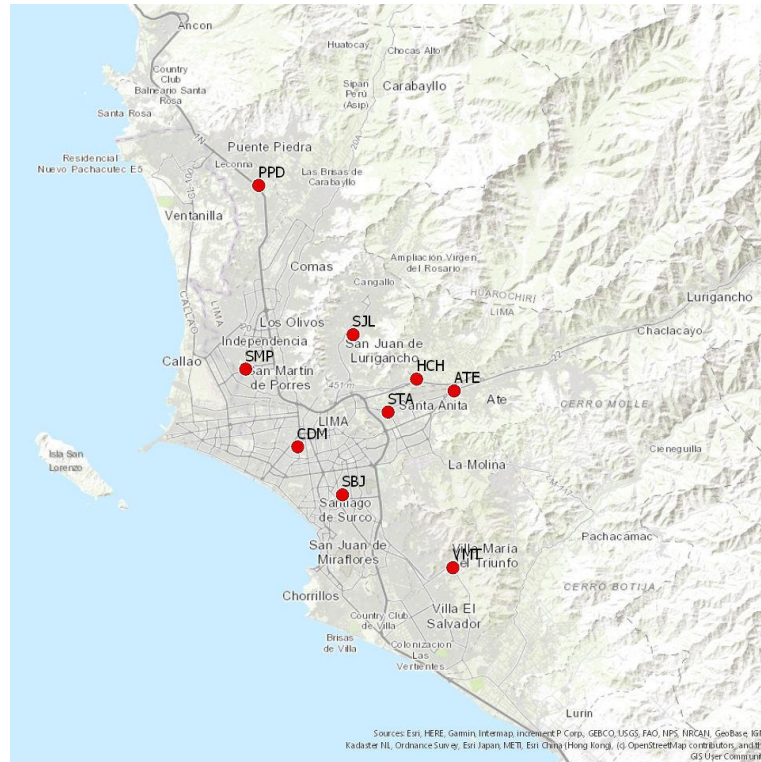
De acuerdo a la naturaleza del estudio la investigación, reunió por su nivel la característica de un estudio aplicativo, porque enmarca a la innovación científica, a propósito de las necesidades de la población objeto.

#### 3.2 Población y muestra

La población motivo de esta investigación son distritos del ámbito de Lima Metropolitana (LM), ver Figura 1. La muestra del estudio fueron nueve distritos de LM: ATE, San Borja (SBJ), Jesús María (CDM), Santa Anita (STA), San Martín de Porras (SMP), Huachipa (HCH), San Juan de Lurigancho (S JL), Villa María del Triunfo (VMT) y Puente Piedra (PPD), la información de la ubicación geográfica se observa en la Tabla 1. En estos distritos el SENAMHI, tiene ubicado las estaciones automáticas, que constan de equipos que monitorean de manera constante los contaminantes y las variables meteorológicas.

## Figura 4

Mapa de ubicación de las estaciones automáticas de calidad del aire y meteorológica en LM



Nota. Elaboración propia.

**Tabla 3**

*Ubicación Geográfica de las Estaciones de Calidad de Aire y Meteorológicas en LM*

Estación	Latitud en grados	Longitud en grados	Altitud m.s.n.m.
ATE	-12.0262	-76.9190	362
CDM	-12.07053	-77.0431	123
HCH	-12.01689	-76.9488	294
PPD	-11.86325	-77.0741	180
SBJ	-12.1086	-77.0076	136
SJL	-11.9816	-76.9992	239
SMP	-12.0089	-77.0845	56
STA	-12.04298	-76.9714	276
VMT	-12.1664	-76.9200	292

Nota. Elaboración propia.



### **3.3 Operacionalización de variables**

Las variables fueron medibles de dimensiones físicas (objetivas) con escala de medida cuantitativa y continua. Las variables independientes son las condiciones meteorológicas que representan los factores que constituyeron la causa, son factores de riesgo para el problema. La variable dependiente es la concentración del material particulado  $PM_{2.5}$ , describió el problema que se estudió, depende de la variable independiente y determino nuestra línea de investigación.

### **3.4 Instrumentos**

Los estudios retrospectivos no requieren instrumentos, se limitan a transcribir la información de datos que previamente fueron medidos.

Los datos fueron del año 2017, de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad de viento) y los datos de concentración de contaminantes atmosféricos por  $PM_{2.5}$ , se tomaron de las estaciones automáticas del SENAMHI, dentro de la red de monitoreo de la calidad del aire de LM.

Los datos se validaron en base a los indicadores por variable que se pretende medir. Como resultado de la aplicación a una muestra de la población, se obtuvo registros de datos de las variables meteorológicas y concentraciones de contaminantes atmosféricos por  $PM_{2.5}$ , en las nueve estaciones de monitoreo del SENAMHI en LM.

### **3.5 Procedimientos**

La población y muestra fueron las mismas durante el año 2017 en las estaciones de ATE, SBJ, CDM, STA, VMT, HCH, SJL, SMP y PPD ubicadas dentro del ámbito de LM y en nueve distritos de la red de calidad del aire del SENAMHI.

Los datos de las variables meteorológicas fueron horarios. Para el análisis se promedió

las 24 h (promedio diario).

Los datos para el contaminante del aire por  $PM_{2.5}$  fueron horarios. Para el análisis se promedió las 24 h (promedio diario).

Para determinar las condiciones físicas y los entornos sinópticos (datos de reanálisis del Global Forecast System\_NOAA) que favorecieron el incremento de los contaminantes en LM, se analizó previamente la ocurrencia del incremento de los contaminantes.

### **3.6 Análisis de datos**

Se realizó a través de la presentación de gráficos de los siguientes análisis:

- Identificación de las concentraciones máximas diarias.
- Distribución porcentual de la calidad del aire registrada durante todo el año 2017, es decir según la categoría asignada.
- Distribución de la calidad del aire por estación.
- Condiciones meteorológicas prevalecientes analizadas antes, durante y después de la ocurrencia del evento.

## IV. RESULTADOS

### 4.1 Variación temporal y espacial diaria de las concentraciones de $PM_{2.5}$ con los Estándares Nacionales de Calidad de Aire.

#### 4.1.1 Comportamiento diario de las Concentraciones de $PM_{2.5}$

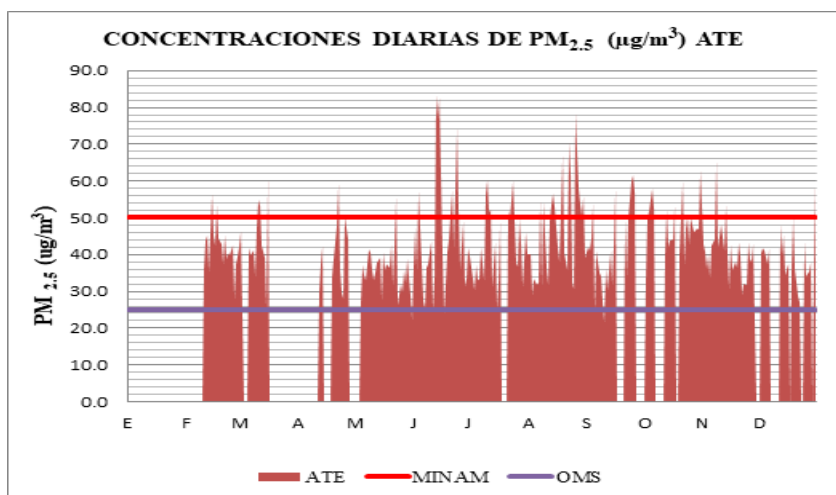
Los resultados del monitoreo de calidad del aire muestreados en las estaciones ATE, SBJ, CDM, STA, VMT, HCH, SJL, SMP y PPD; en los gráficos se analizó los valores de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , desde el 01 de enero hasta el 31 de diciembre del año 2017. El criterio considerado para la evaluación del muestreo tiene concordancia con el Estándares Nacional de Calidad Ambiental del Aire (D.S. N°003-2017-MINAM) y las Guías de la calidad del aire de la OMS (GCA) para MP (2005).

#### Estación ATE

Presentó los valores de concentraciones de  $PM_{2.5}$  más elevadas comparándolas con las demás estaciones monitoreadas. Superó los valores del Estándar Nacional de Calidad del Aire del D.S. N°003-2017 MINAM en 47 oportunidades, en todos los meses del año. MINAM indica un valor estándar de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un periodo de 24 horas y sin excederse en más de 7 veces al año. Junio, presento los valores más altos, los días 13, 14 y 15 con valores de  $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Agosto, fue el segundo mes que sobrepaso con días continuos. El día 22 presentó el pico más alto con  $70,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de concentración (Figura 5). A su vez, julio, setiembre, octubre y noviembre presentaron picos de menor concentración. Según el estándar indicado por la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la estación de ATE sobrepaso todo el año.

## Figura 5

Concentraciones diarias de  $PM_{2.5}$  en la estación del distrito de ATE en el año 2017



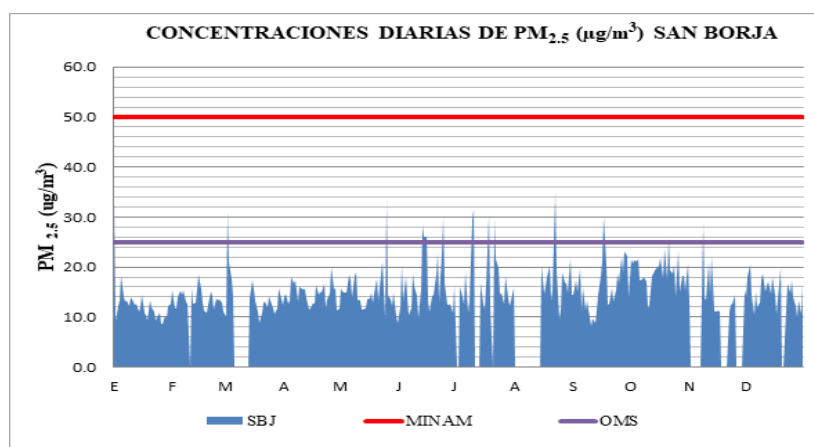
Nota. Elaboración propia.

### Estación SBJ

No presentó concentraciones que superaran el Estándar Nacional de Calidad del Aire de los Decreto Supremo N°003-2017-MINAM para  $PM_{2.5}$  en 24 horas, cuyos valores son de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, presentó concentraciones que superaron el estándar indicado por la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en 14 oportunidades. En agosto, el día 22 fue el de mayor concentración con  $34,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , los meses de junio y julio presentaron días continuos de concentraciones mayores a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## Figura 6

*Concentraciones diarias de  $PM_{2.5}$  en la estación del distrito de San Borja en el año 2017*



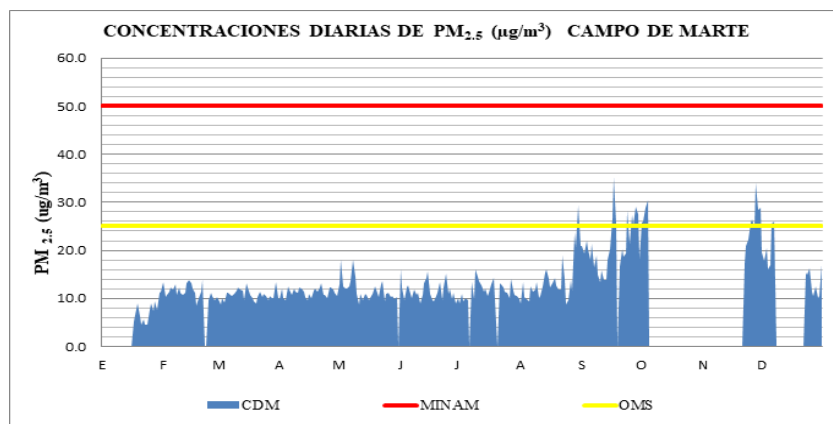
*Nota.* Elaboración propia

### Estación CDM

No presentó concentraciones mayores al Estándar Nacional de Calidad del Aire de los Decreto Supremo N°003-2017-MINAM para  $PM_{2.5}$  en 24 horas, cuyos valores son de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, si superaron el estándar indicado por la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 14 oportunidades. De setiembre a diciembre, se presentaron días continuos de mayor concentración: El día 17 de setiembre fue el pico más alto con  $35,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de concentración.

## Figura 7

Concentraciones diarias de  $PM_{2.5}$  en la estación del Campo de Marte en el año 2017



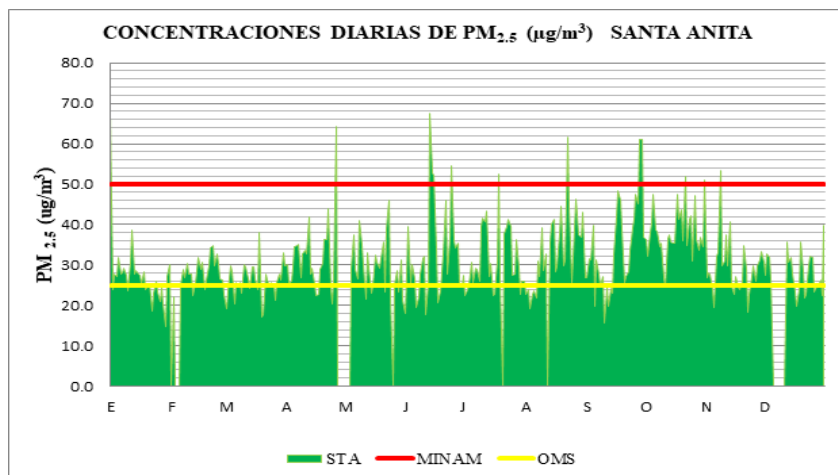
Nota. Elaboración propia.

### Estación STA

La estación STA presentó picos de valores de concentraciones de  $PM_{2.5}$  que sobrepasaron los valores del Estándar Nacional de Calidad del Aire del D.S. N°003-2017 MINAM en 13 oportunidades, en diferentes meses del año. MINAM indica un valor estándar de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un periodo de 24 horas y sin excederse en más de 7 veces al año. Junio, fue el mes que presentó el valor más alto, el día 13 con valor de  $67,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  los siguientes días de  $52,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $52,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Agosto, fue el segundo mes que sobrepasó de concentración, el día 22 con  $61,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A su vez, los meses de septiembre a noviembre también registraron días con alta concentración. Por otro lado, según el estándar indicado por la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la estación de STA todos los meses el año 2017 sobrepasó.

**Figura 8**

*Concentraciones diarias de  $PM_{2,5}$  en la estación del distrito de Santa Anita en el año 2017*



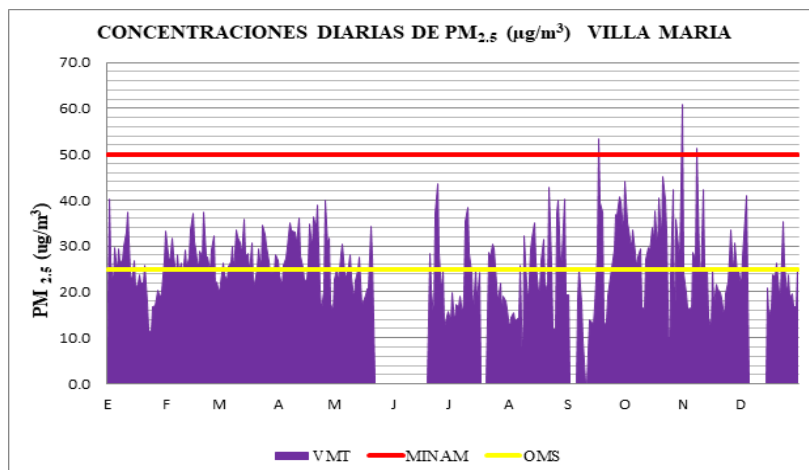
*Nota.* Elaboración propia.

### Estación VMT

La estación VMT presentó picos de valores de concentraciones de  $PM_{2,5}$  que sobrepasaron los valores del Estándar Nacional de Calidad del Aire del D.S. N°003-2017 MINAM en 3 oportunidades, en los meses de setiembre, octubre y noviembre con valores de 50,8, 64,7 y 65,7 respectivamente. MINAM indica un valor estándar de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un periodo de 24 horas y sin excederse en más de 7 veces al año. Por otro lado, según el estándar indicado por la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la estación de VMT sobrepasó sus registros en la mayoría los meses del año 2017.

**Figura 9**

*Concentraciones diarias de PM<sub>2.5</sub> en la estación del distrito de Villa María en el año 2017*



*Nota.* Elaboración propia.

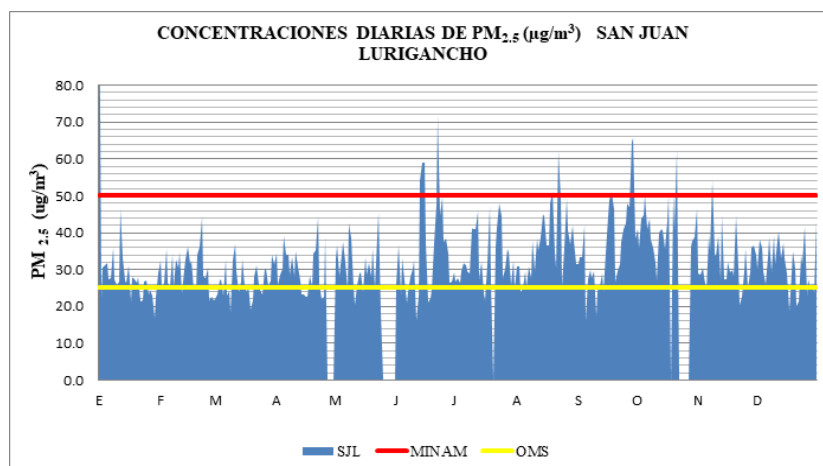
### Estación SJL

La estación SJL presentó picos de valores de concentraciones de PM<sub>2.5</sub> que superaron los valores del Estándar Nacional de Calidad del Aire del D.S. N°003-2017 MINAM en 13 oportunidades, MINAM indica un valor estándar de 50 µg/m<sup>3</sup> para un periodo de 24 horas y sin excederse en más de 7 veces al año. La concentración más alta se registró el 1 de enero con 119,1 µg/m<sup>3</sup>, seguido por días consecutivos el junio, el día 22 registró el pico más alto de 71,4 µg/m<sup>3</sup>. Los meses de agosto, setiembre y octubre registraron concentraciones de forma aisladas. Por otro lado, según el estándar indicado por la OMS de 25 µg/m<sup>3</sup>, la estación de SJL sobrepasó sus registros en todos los meses del año 2017.



## Figura 10

Concentraciones diarias de  $PM_{2.5}$  en la estación del distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2017



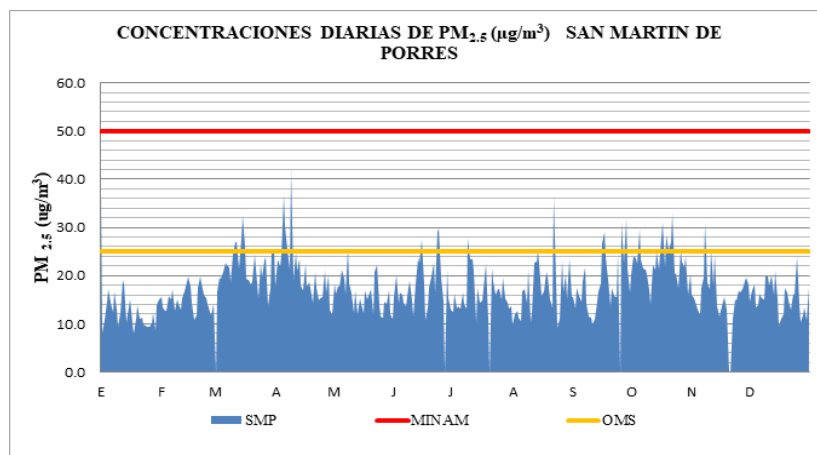
Nota. Elaboración propia.

### Estación SMP

La estación de SMP no presentó concentraciones mayores al Estándar Nacional de Calidad del Aire de los Decreto Supremo N°003-2017-MINAM para  $PM_{2.5}$  en 24 horas, cuyos valores son de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, si sobrepasaron el estándar indicado por la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 33 oportunidades. De marzo a noviembre, se presentaron días continuos de mayor concentración: El día 9 de abril registró el pico más alto con  $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$  seguido del día 5 con  $36,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , agosto registró otro pico de  $36,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el día 22.

## Figura 11

*Concentraciones diarias de PM<sub>2.5</sub> en la estación del distrito de San Martín de Porres en el año 2017*



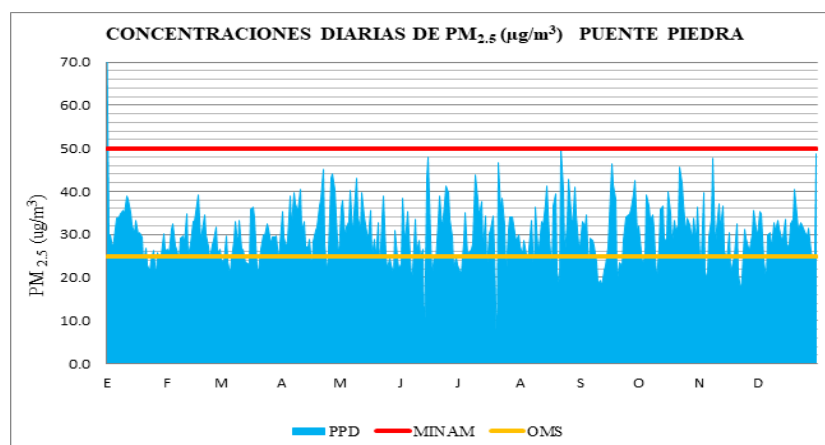
*Nota.* Elaboración propia.

### Estación PPD

La estación de PPD no presentó concentraciones que sobrepasaron el Estándar Nacional de Calidad del Aire de los Decreto Supremo N°003-2017-MINAM para PM<sub>2.5</sub> en 24 horas, cuyos valores son de 50 µg/m<sup>3</sup>, excepto el 1 de enero un pico de 86 µg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, presento concentraciones que superaron el estándar indicado por la OMS de 25 µg/m<sup>3</sup>, en la mayoría de los meses del año. En agosto, el día 22 fue el de mayor concentración con 49,9 µg/m<sup>3</sup>.

## Figura 12

*Concentraciones diarias de PM<sub>2.5</sub> en la estación del distrito de Puente Piedra en el año 2017*



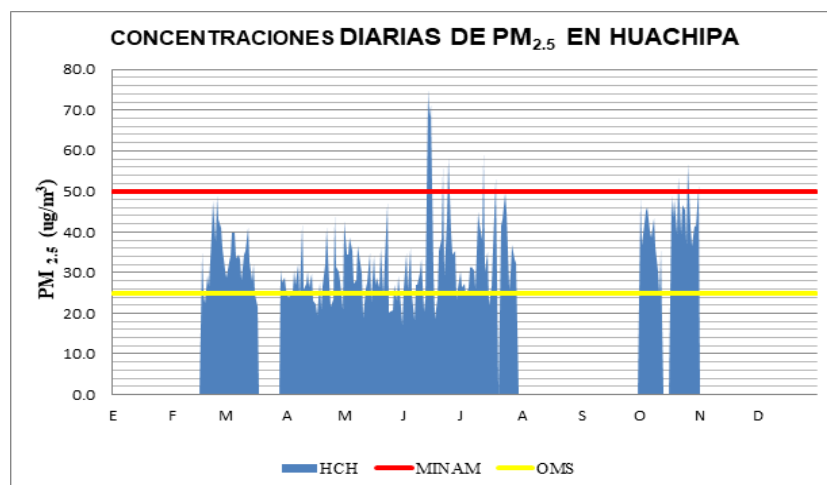
*Nota.* Elaboración propia.

### Estación HUH

La estación HUH presentó picos de concentraciones de PM<sub>2.5</sub> que sobrepasaron los valores del Estándar Nacional de Calidad del Aire del D.S. N°003-2017 MINAM en 10 oportunidades, MINAM indica un valor estándar de 50 µg/m<sup>3</sup> para un periodo de 24 horas y sin excederse en más de 7 veces al año. La concentración más alta se registró el 13 de junio con 74,7 µg/m<sup>3</sup>. Julio y octubre registraron picos ligeros. Por otro lado, según el estándar indicado por la OMS de 25 µg/m<sup>3</sup>, la estación de HUH sobrepasó en la mayoría de los meses sus registros del año 2017.

**Figura 13**

*Concentraciones diarias de  $PM_{2.5}$  en la estación del distrito Huachipa en el año 2017*



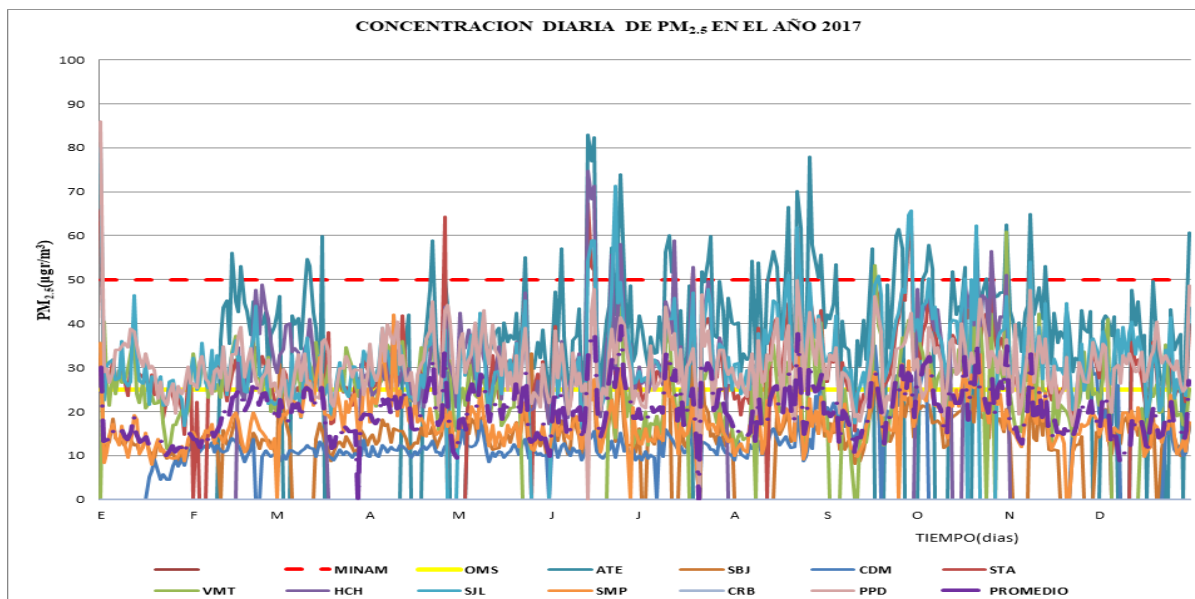
*Nota.* Elaboración propia.

#### ***4.1.2 Comparativo diario de las concentraciones de $PM_{2.5}$ de las estaciones de monitoreo y los estándares de calidad del aire.***

En la Figura 14 se observó los registros promedios diarios de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de las nueve estaciones de monitoreo en Lima Metropolitana en el año 2017 y la comparación con los estándares. Las estaciones que superaron los valores del Estándar Nacional de Calidad del Aire del D.S. N°003-2017 MINAM que indica un valor estándar de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un período de 24 horas y sin excederse en más de 7 veces al año, fueron ATE, STA, VMT, SJL y HCH. Por otro lado, las estaciones de CDM, SMP, SBJ y PDP solo superaron el estándar indicado por la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Figura 14**

*Promedios diarios del  $PM_{2.5}$  de las estaciones y su relación con los estándares de calidad de aire*



*Nota.* Elaboración propia.

## 4.2 Comportamiento Temporal y Espacial de las Variables Meteorológicas

El análisis de las variables meteorológicas se realizó con los registros de las estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI, que se encuentran en el mismo lugar que la red de las estaciones de la calidad del aire. Se consideraron datos de las variables de viento (velocidad), temperatura del aire y humedad relativa. El estudio de estas variables son importante, por los diversos factores climáticos que rodea a cada distrito de la ciudad de Lima Metropolitana.

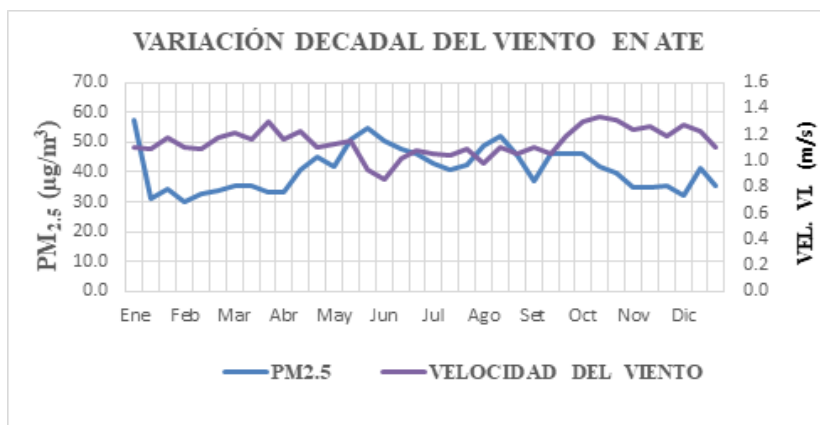
### 4.2.1 Correlación de las variables meteorológicas y la concentración del $PM_{2.5}$ en ATE

#### Viento

En la Figura 15 se observó que las concentraciones promedio decadales  $PM_{2.5}$  tienen un comportamiento estacional. En verano la concentración fue menor que invierno. La velocidad del viento es inversa a las concentraciones  $PM_{2.5}$ , en las estaciones de verano y primavera con tendencia disminuir.

**Figura 15**

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la velocidad del viento en ATE*



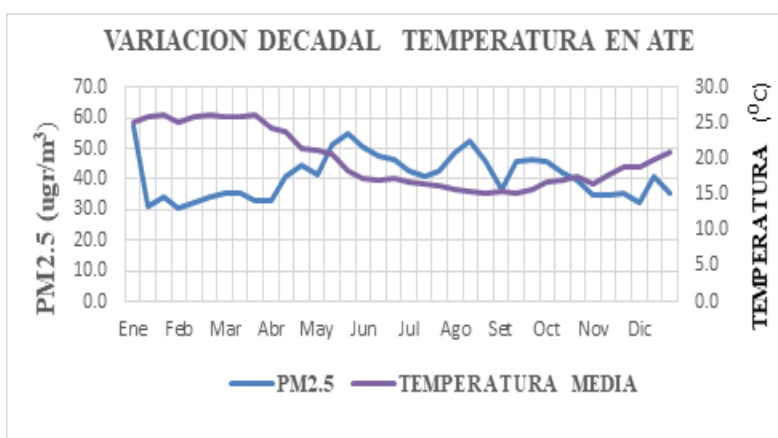
*Nota.* Elaboración propia.

### Temperatura del aire

En la Figura 16 se observó que las concentraciones promedio decadales  $PM_{2.5}$  tienen un comportamiento estacional, de menor concentración en verano con tendencia a incrementar en invierno. Del mismo modo, la temperatura del aire incrementa en verano con tendencia a bajar en invierno. Ambas variables son inversas.

**Figura 16**

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la temperatura del aire en ATE*



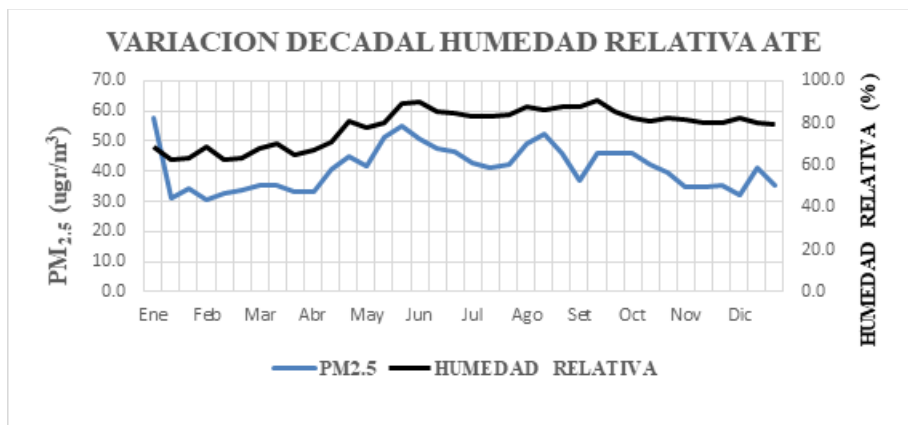
*Nota.* Elaboración propia.

## Humedad Relativa

En la Figura 17 las concentraciones promedio decadales  $PM_{2.5}$  presentaron un comportamiento estacional menor en verano y mayor en invierno. Del mismo modo la Humedad Relativa es estacional, presentando picos máximos en invierno.

**Figura 17**

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la humedad relativa en ATE*



*Nota.* Elaboración propia.

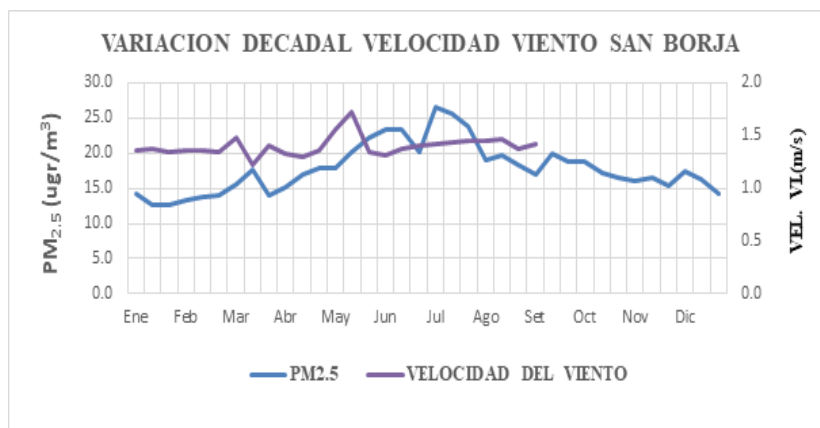
### 4.2.2 Correlación de las variables meteorológicas y la concentración del $PM_{2.5}$ en SBJ

#### Viento

En la Figura 18 se observó que entre enero y marzo las concentraciones promedio decadales  $PM_{2.5}$  están entre 13 y 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y los vientos variando entre 1,4 m/s, en abril y junio las concentraciones  $PM_{2.5}$  con tendencia a subir de 14 a 23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y los vientos suben de 1,4 a 1,7 m/s, en julio y agosto las concentraciones  $PM_{2.5}$  se presentó un pico de 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y los vientos tienden subir o permanecer constantes 1,4 m/s. Las concentraciones  $PM_{2.5}$ , con tendencia a bajar de setiembre a diciembre.

**Figura 18**

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la velocidad del viento en San Borja*



*Nota.* Elaboración propia.

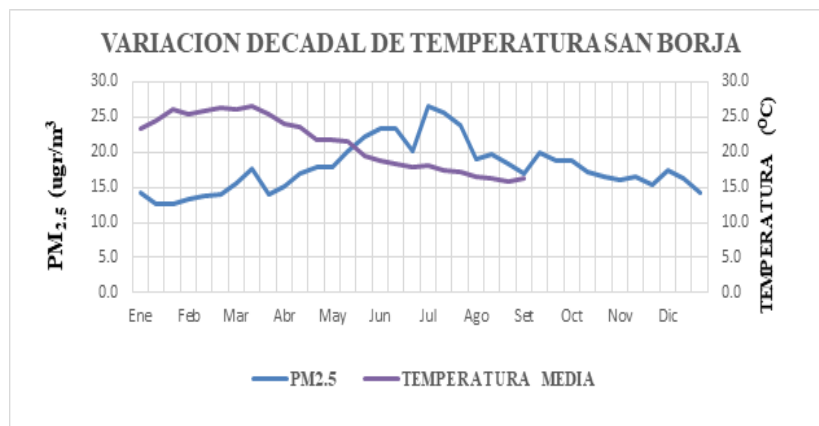
### Temperatura del aire

Se observó que entre enero y abril las concentraciones promedio decadales  $PM_{2.5}$  con tendencia a incrementar 14 y 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y la temperatura entre 25°C, entre mayo y setiembre las concentraciones  $PM_{2.5}$  registraron un promedio de 40 a 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y la temperatura bajo entre 25 a 20°C, entre setiembre y diciembre las concentraciones  $PM_{2.5}$  bajan de 30 a 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y la temperatura aumenta de entre 20 a 25°C, lo cual nos conduce a decir que el comportamiento de la temperatura del aire es inverso a las concentraciones  $PM_{2.5}$ .



## Figura 19

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la temperatura del aire en San Borja*



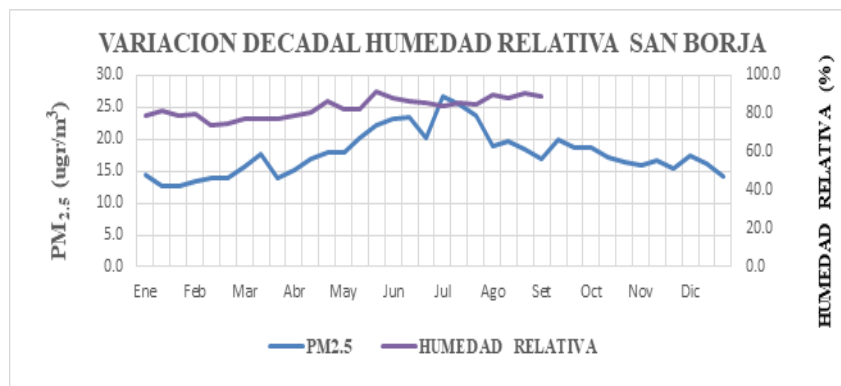
*Nota.* Elaboración propia.

## Humedad Relativa

La Figura 19 registró que entre enero y junio las concentraciones promedio decadales  $PM_{2.5}$  con tendencia subir de 13 a 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y la Humedad Relativa entre 78 a 93 %, julio a diciembre las concentraciones  $PM_{2.5}$  tienden a bajar de 26 a 14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y la Humedad Relativa incrementa de 80 a 95%, setiembre y diciembre las concentraciones  $PM_{2.5}$  bajan de 26 a 14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  por el cual concluyo que la Humedad Relativa tienen la misma tendencia que las concentraciones  $PM_{2.5}$ .

**Figura 20**

*Promedios decadales de PM<sub>2.5</sub> y su comportamiento con la humedad relativa en San Borja*



*Nota.* Elaboración propia.

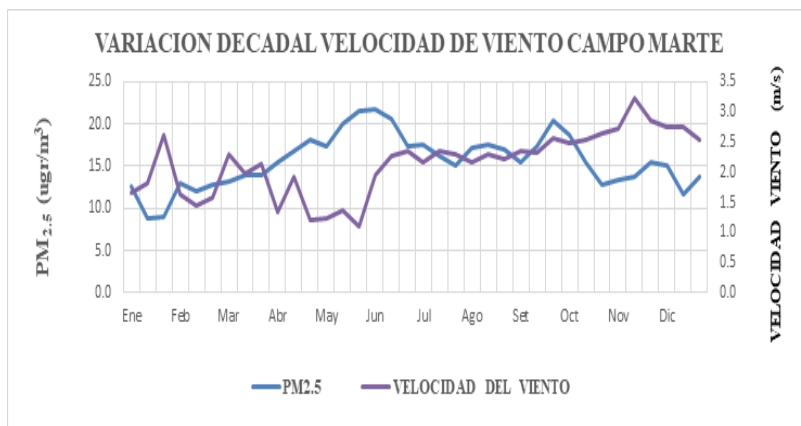
#### **4.2.3 Correlación de las variables meteorológicas y la concentración del PM<sub>2.5</sub> en CDM**

##### **Viento**

La Figura 21 registró que entre enero y junio las concentraciones promedio decadales PM<sub>2.5</sub> con tendencia a subir 9 y 23 µg/m<sup>3</sup> y la velocidad del vientos variando entre 1,4 hasta 2,9 m/s, en julio a octubre las concentraciones PM<sub>2.5</sub> con tendencia a bajar de 23 a 15 µg/m<sup>3</sup> y permanecer constante los vientos permanecen constante de 2,0 a 2,5 m/s, en noviembre a diciembre las concentraciones PM<sub>2.5</sub> con tendencia disminuir 15 a 12 µg/m<sup>3</sup> y los vientos tienden subir o permanecer constantes 2,5 m/s.

**Figura 21**

*Promedios decadales de PM<sub>2.5</sub> y su comportamiento con la velocidad del viento en Campo de Marte*



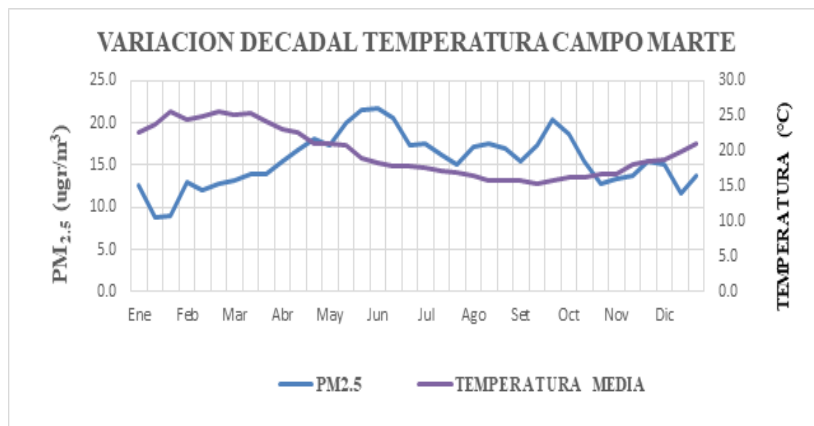
*Nota.* Elaboración propia.

**Temperatura del aire**

Se observó que entre enero a mayo las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> tienen tendencia a incrementar y la temperatura permanece constante alrededor 25°C a fines de abril con tendencia bajar. Sin embargo, la temperatura de junio a octubre con tendencia bajar en algunos meses. El comportamiento de ambos es inverso.

**Figura 22**

*Promedios decadales de PM<sub>2.5</sub> y su comportamiento con la temperatura del aire en Campo de Marte*



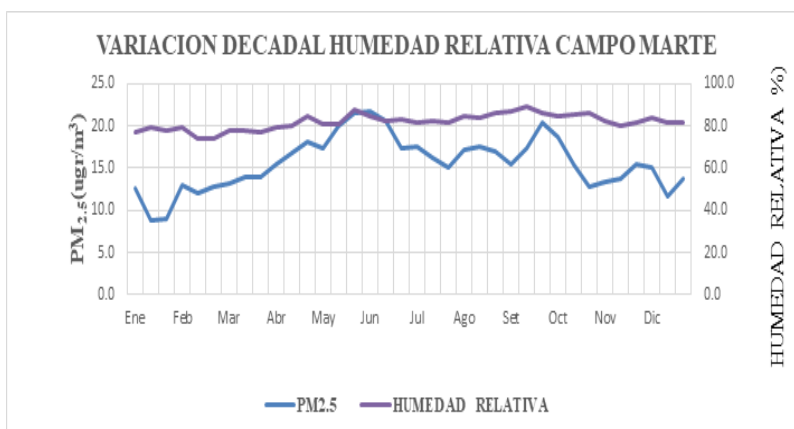
*Nota.* Elaboración propia.

## Humedad Relativa

Se observó que la humedad relativa no presenta una variación marcada durante el año, ligero entre las estaciones. Sin embargo, la concentración  $PM_{2.5}$  varía entre las estaciones, siendo más alto en el invierno.

### Figura 23

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la humedad relativa en Campo de Marte*



*Nota.* Elaboración propia.

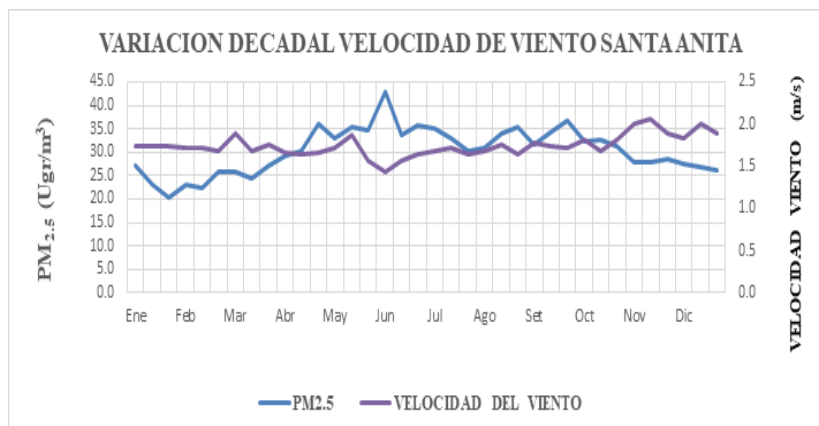
#### 4.2.4 Correlación de las variables meteorológicas y la concentración del $PM_{2.5}$ en Sta. Anita

##### Viento

La Figura 24 se observó que la concentración  $PM_{2.5}$  en verano presenta tendencia subir, incluso hasta junio. De julio a hasta octubre presenta ligera variación y noviembre a diciembre con tendencia disminuir. Por otro lado, se observa que la velocidad del viento no presenta variación marcada durante el año, en su comportamiento es inverso a las concentraciones.

**Figura 24**

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la velocidad del viento en Sta. Anita*



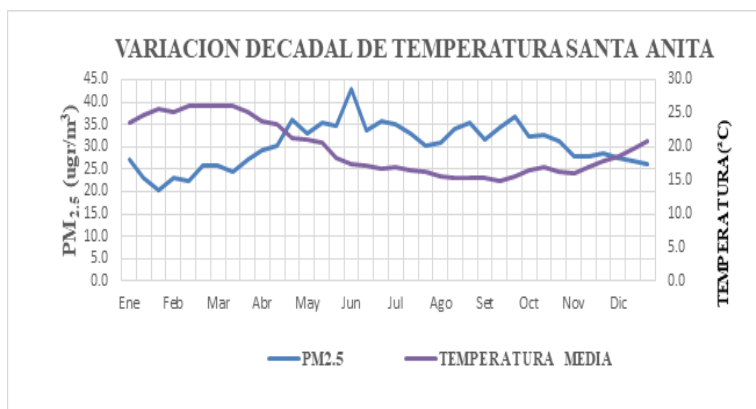
*Nota.* Elaboración propia.

### Temperatura del aire

En la Figura 25 observamos que la concentración  $PM_{2.5}$  en verano presentó tendencia a subir, incluso hasta junio. De julio a hasta octubre presento ligera variación y de noviembre a diciembre con tendencia disminuir. Mientras que, la temperatura con tendencia a subir en verano y disminuir en invierno.

**Figura 25**

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la temperatura del aire en Sta. Anita*



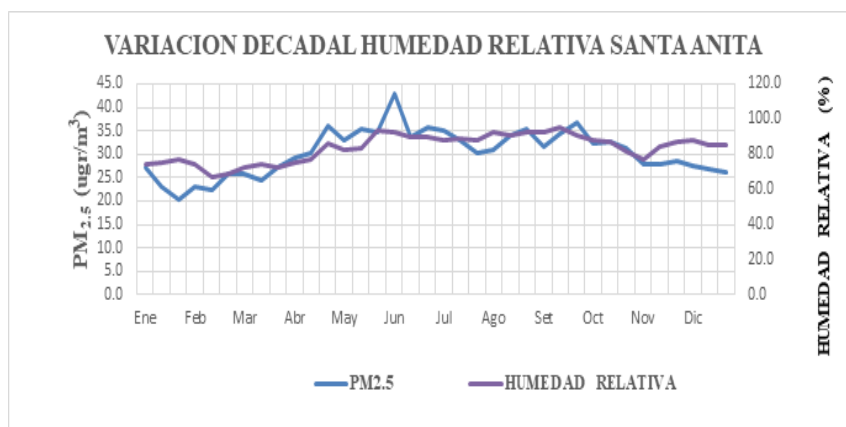
*Nota.* Elaboración propia

## Humedad Relativa

Se observó que las concentraciones promedio decadales  $PM_{2.5}$  tienen un comportamiento estacional, menor en verano con tendencia incrementar en invierno para luego disminuir en primavera. También se observa que el primer y último mes del año son inversos. De igual manera la Humedad Relativa comportamiento estacional incrementando en invierno.

**Figura 26**

*Promedios decadales de  $PM_{2.5}$  y su comportamiento con la humedad relativa en Sta. Anita*



*Nota.* Elaboración propia.

### 4.2.5 Variación del promedio estacional de las concentraciones de $PM_{2.5}$

En la Tabla 4 y Figura 27 se observó la distribución de la concentración según las estaciones del año, en todas las estaciones monitoreadas.

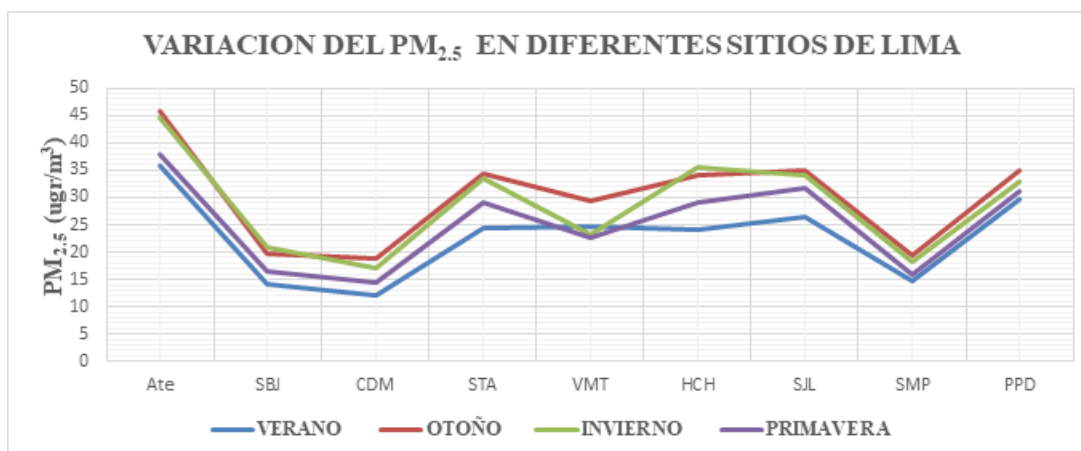
**Tabla 4***Promedio estacional de las concentraciones PM<sub>2.5</sub> en las estaciones de Lima Metropolitana*

	<b>Estaciones</b>	<b>Ate</b>	<b>SBJ</b>	<b>CDM</b>	<b>STA</b>	<b>VMT</b>	<b>HCH</b>	<b>SJL</b>	<b>SMP</b>	<b>PPD</b>
	Meses	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
<b>Verano</b>	Enero	40,90	13,16	10,08	23,51	21,75	21,20	25,51	13,23	28,94
	Febrero	32,24	13,66	12,60	23,63	24,85	23,41	24,80	13,99	29,40
	Marzo	34,58	15,74	13,64	25,71	27,56	27,56	28,94	16,90	30,39
	Promedio	35,90	14,19	12,10	24,28	24,72	24,06	26,41	14,71	29,58
<b>Otoño</b>	Abril	39,54	16,66	16,84	31,81	32,16	33,20	35,36	19,99	37,42
	Mayo	49,23	20,08	19,62	34,28	30,38	34,59	34,05	19,13	34,60
	Junio	48,26	22,26	19,93	37,40	25,79	34,82	35,54	19,52	32,74
	Promedio	45,68	19,67	18,80	34,50	29,44	34,20	34,98	19,55	34,92
<b>Invierno</b>	Julio	42,08	25,32	16,31	32,81	21,76	35,06	33,66	18,95	33,41
	Agosto	49,04	19,00	17,21	33,49	22,95	35,57	35,15	18,06	33,40
	Setiembre	42,91	18,54	17,76	34,37	25,19	35,92	33,58	17,34	31,83
	Promedio	44,68	20,95	17,09	33,56	23,30	35,52	34,13	18,12	32,88
<b>Primavera</b>	Octubre	42,52	17,50	15,70	32,05	21,33	34,29	34,94	17,85	31,98
	Noviembre	35,05	15,99	14,22	28,09	22,06	26,09	30,84	15,46	29,89
	Diciembre	36,24	15,96	13,54	26,73	24,24	26,66	29,04	14,52	31,68
	Promedio	37,94	16,49	14,49	28,96	22,54	29,01	31,61	15,95	31,18

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 27**

*Variación estacional de la concentración por  $PM_{2.5}$  en cada estación*



*Nota.* Elaboración propia.

#### ***4.2.6 Las condiciones meteorológicas (Velocidad de viento, Humedad Relativa y Temperatura del aire) en la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ en Lima metropolitana año 2017***

Para el Modelamiento de las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa y velocidad de viento se planteó una regresión lineal múltiple para cada una de las estaciones disponibles en los distritos, tales como Ate, San Borja, Jesús María, Santa Anita, Villa María, San Juan de Lurigancho, Huachipa, Puente Piedra. y se obtuvo las ecuaciones lineales con las tres variables meteorológicas como a la independiente y de material particulado como dependiente los cuales se muestran desde la ecuación 4.1 ecuación 4.6 y sus respectivos coeficientes de correlación para cada una ellas.

Así mismo se encontró las relaciones Velocidad de Viento con material particulado  $PM_{2.5}$ , Humedad Relativa con material particulado  $PM_{2.5}$  y Temperaturas con material particulado  $PM_{2.5}$  para cada uno de los distritos representados por sus estaciones los cuales son mostrados en las figuras 28 a la 45



También se obtuvo la relación de la probabilidad de ocurrencia del material particulado  $PM_{2.5}$  y su magnitud, para cada uno de los distritos estudiados, estos resultados se muestran en la figura 46

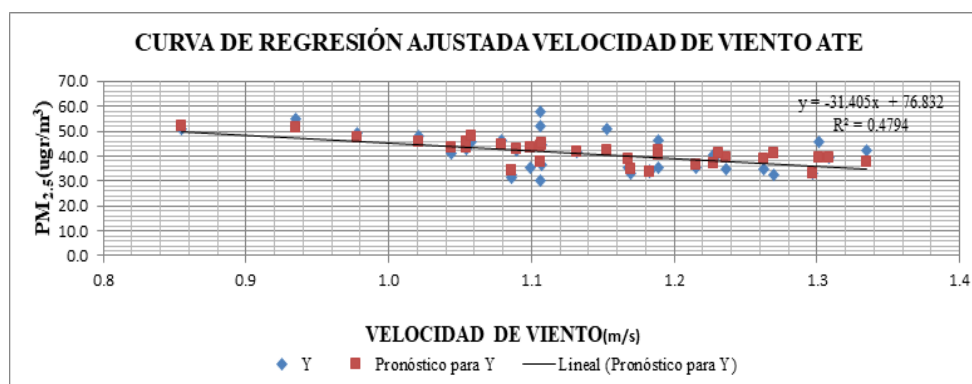
#### Distrito Ate

$$PM_{2.5} = -19.3847312 - 0.8089199TEM + 0.78618267HR - 15.3012727VEL.VIENTO \quad (4.1)$$

$$r = 0.669589297$$

#### **Figura 28**

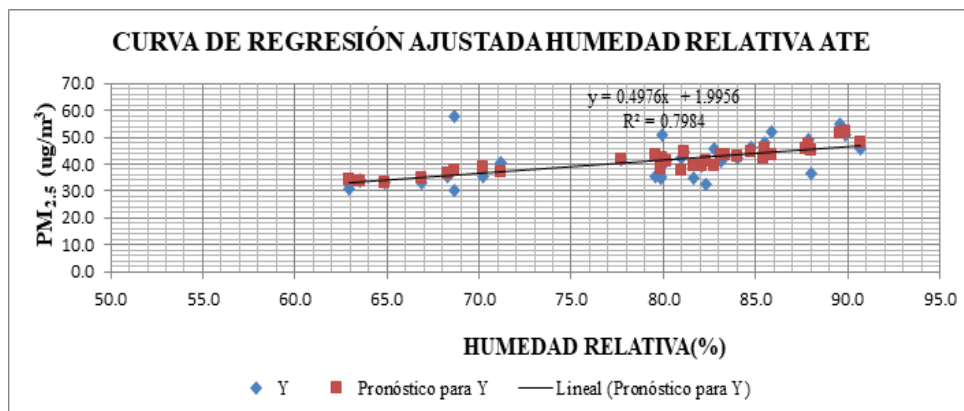
*Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Ate*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 29**

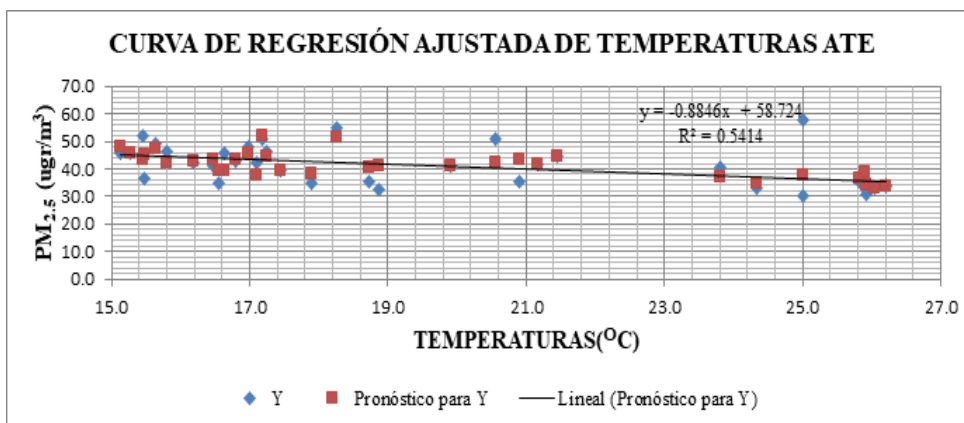
Curva de relación entre la humedad relativa y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Ate



Nota. Elaboración propia.

**Figura 30**

Curva de relación entre la temperatura y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Ate



Nota. Elaboración propia.

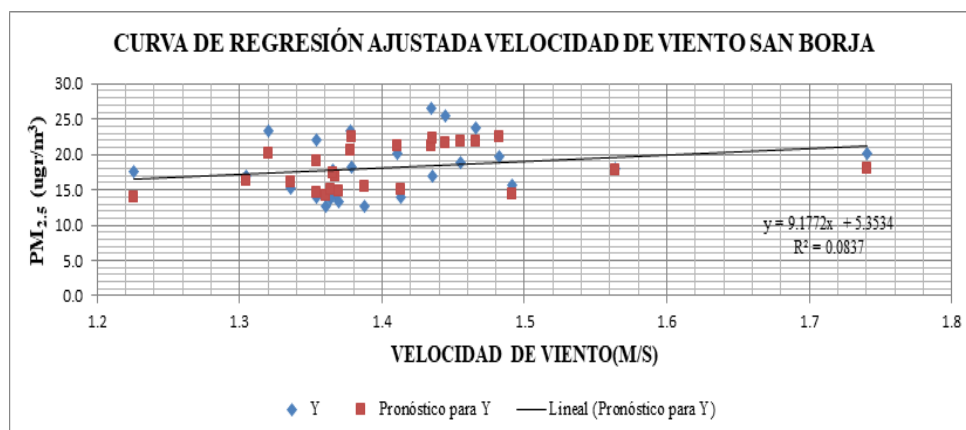
### Distrito San Borja

$$PM_{2.5} = 50.7799883 - 0.97055709TEM - 0.13981108HR - 15.578937VEL.VIENTO \quad (4.2)$$

$$r = 0.74840447$$

**Figura 31**

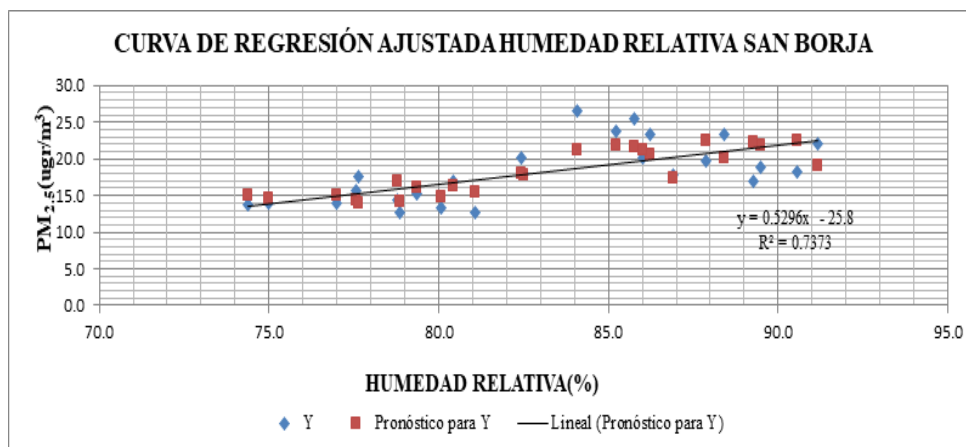
Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de San Borja



Nota. Elaboración propia.

**Figura 32**

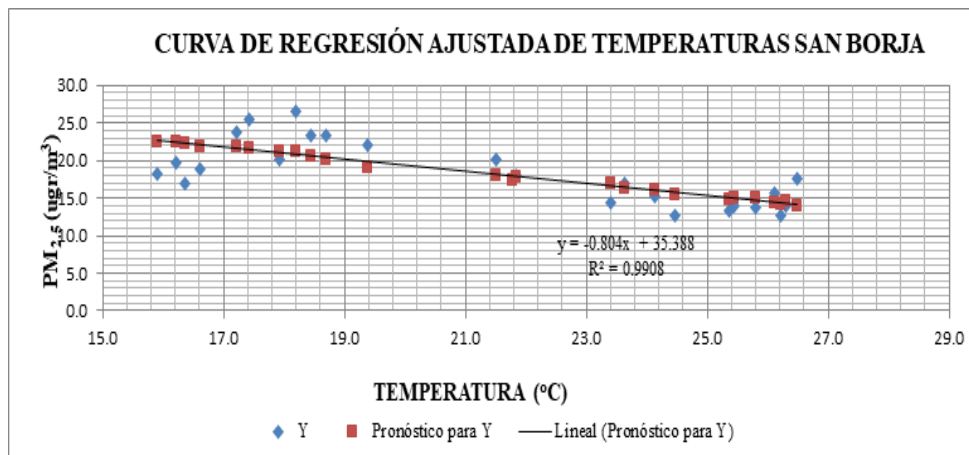
Curva de relación entre la humedad relativa y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de San Borja



Nota. Elaboración propia.

**Figura 33**

Curva de relación entre la temperatura y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de San Borja



Nota. Elaboración propia

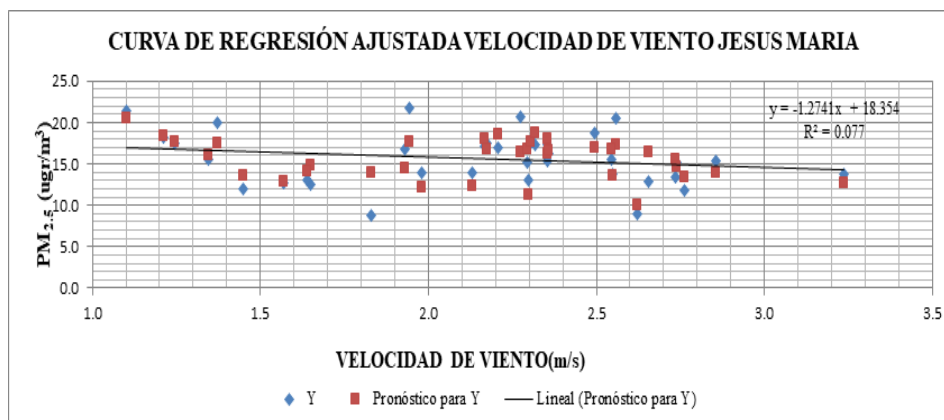
#### Distrito Jesús María

$$PM_{2.5} = 21.1783472 - 0.58639592TEM + 0.1609597HR - 3.32140404VEL.VIENTO \quad (4.3)$$

$$r = 0,75885552$$

**Figura 34**

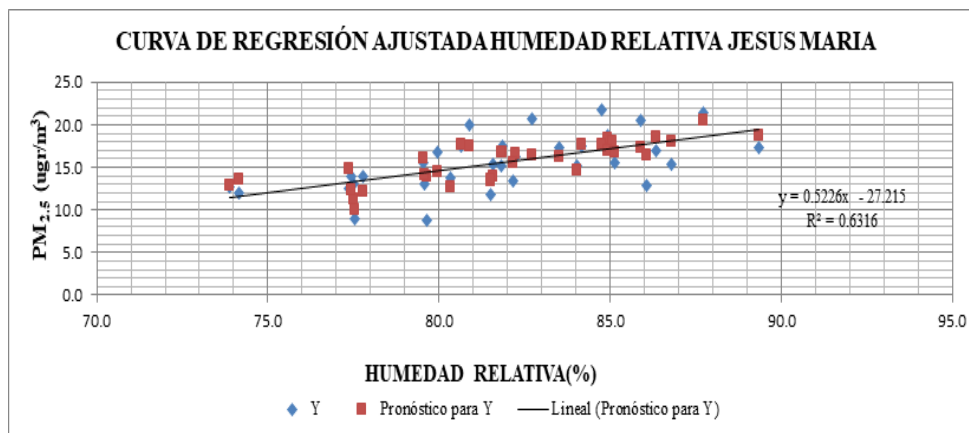
Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Jesús María



Nota. Elaboración propia.

**Figura 35**

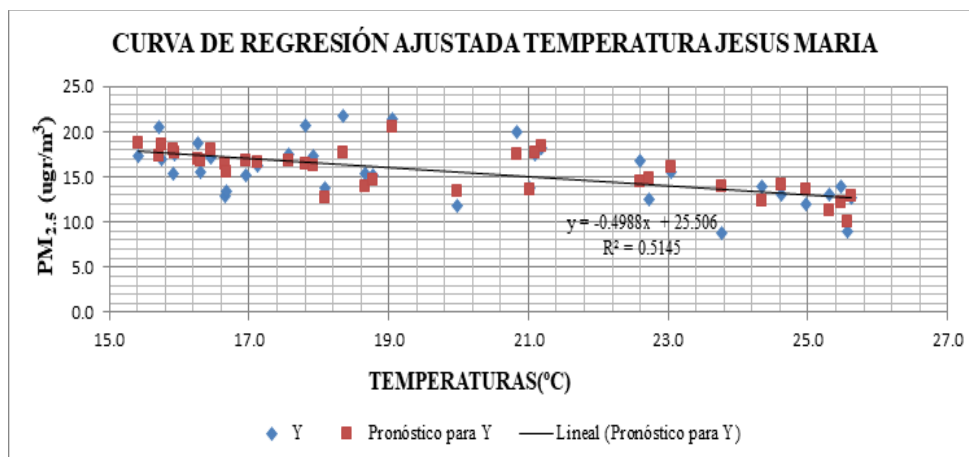
Curva de relación entre la humedad relativa y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Jesús María



Nota. Elaboración propia.

**Figura 36**

Curva de relación entre la temperatura y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Jesús María



Nota. Elaboración propia.

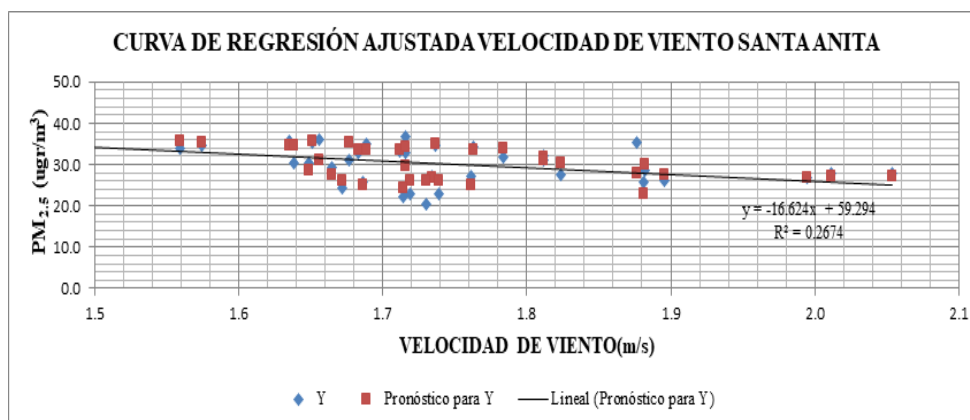
### Distrito Santa Anita

$$PM_{2.5} = 55,3292445 - 0,59234069TEM + 0,15935477HR - 15,2824377VEL.VIENTO \quad (4.4)$$

$$r = 0.83264852$$

**Figura 37**

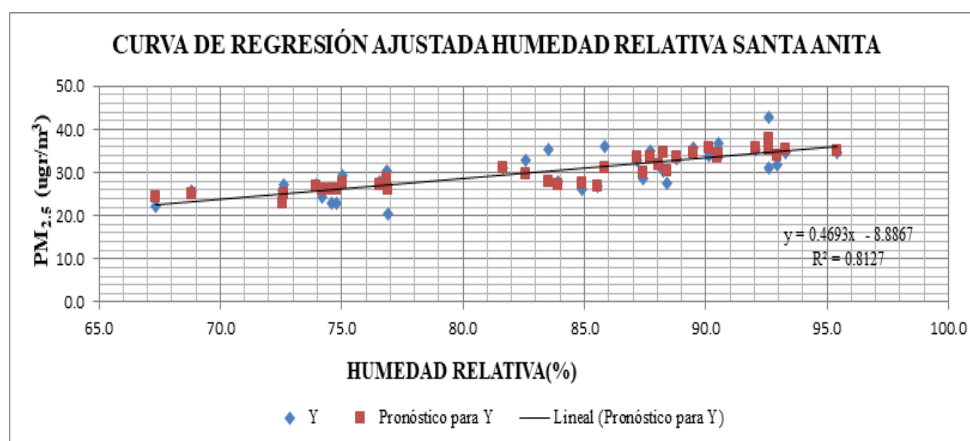
Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Santa Anita



Nota. Elaboración propia.

**Figura 38**

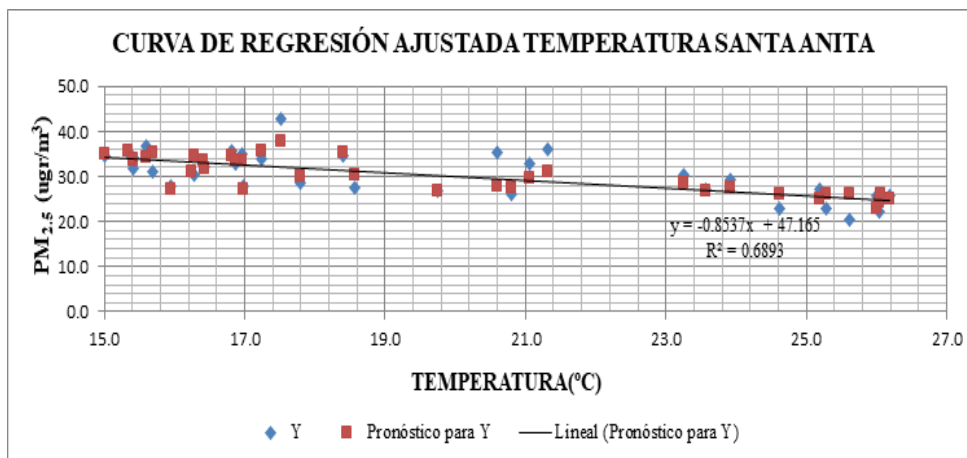
Curva de relación entre la humedad relativa y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Santa Anita



Nota. Elaboración propia.

**Figura 39**

Curva de relación entre la temperatura y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Santa Anita



Nota. Elaboración propia.

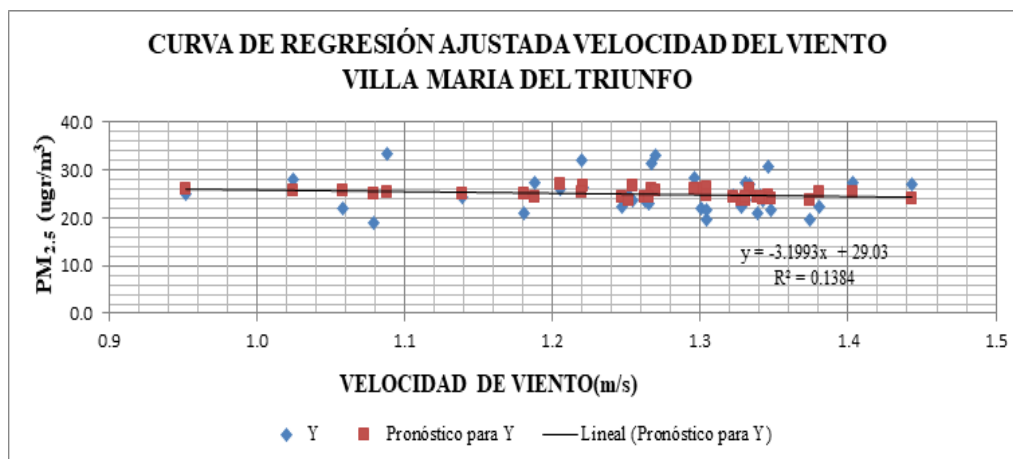
Distrito Villa María del Triunfo

$$PM_{2.5} = 39,2814361 + 0,04616288TEM + 0,08955865HR - 5,98425218VEL.VIENTO \quad (4.5)$$

$$r = 0,25076114$$

**Figura 40**

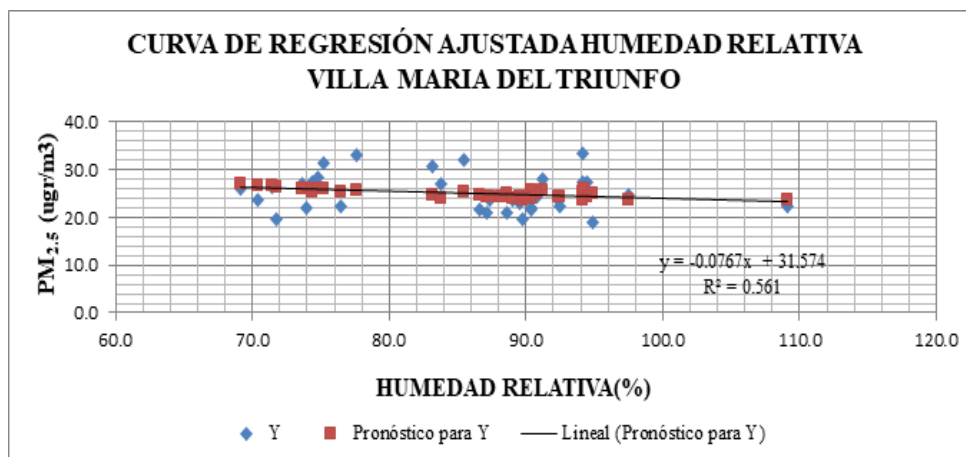
Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Villa María del Triunfo



Nota. Elaboración propia.

**Figura 41**

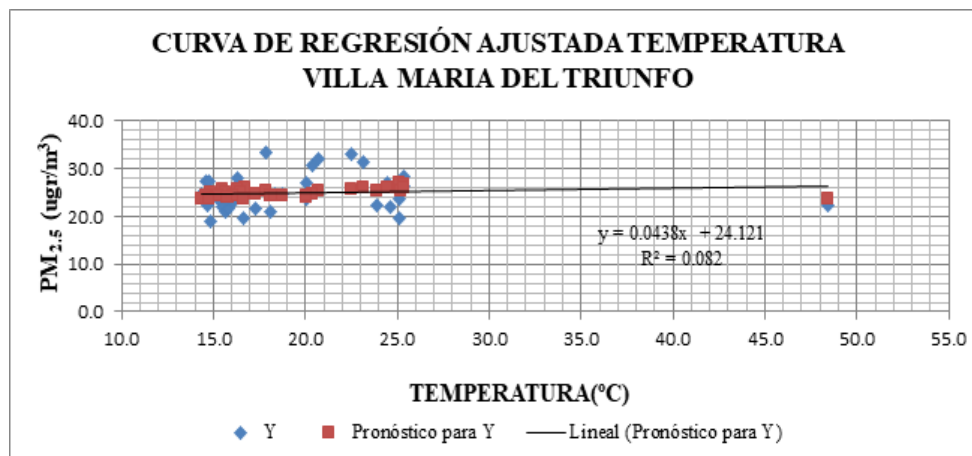
Curva de relación entre la humedad relativa y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Villa María del Triunfo



Nota. Elaboración propia.

**Figura 42**

Curva de relación entre la temperatura y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de Villa María del Triunfo



Nota. Elaboración propia.

### Distrito San Juan de Lurigancho

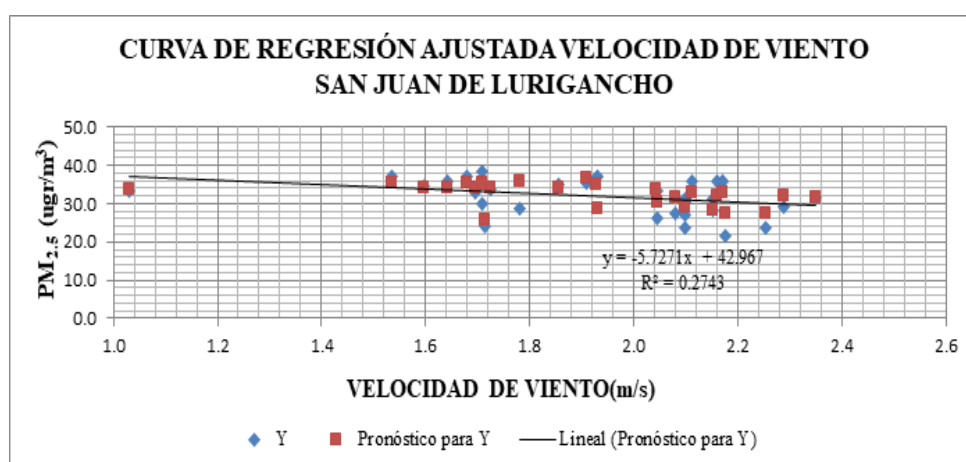
$$PM_{2.5} = 20,5686944 - 0,38106742TEM + 0,24381799HR - 2,8649839VEL.VIENTO \quad (4.6)$$

$$r = 0,669044201$$



**Figura 43**

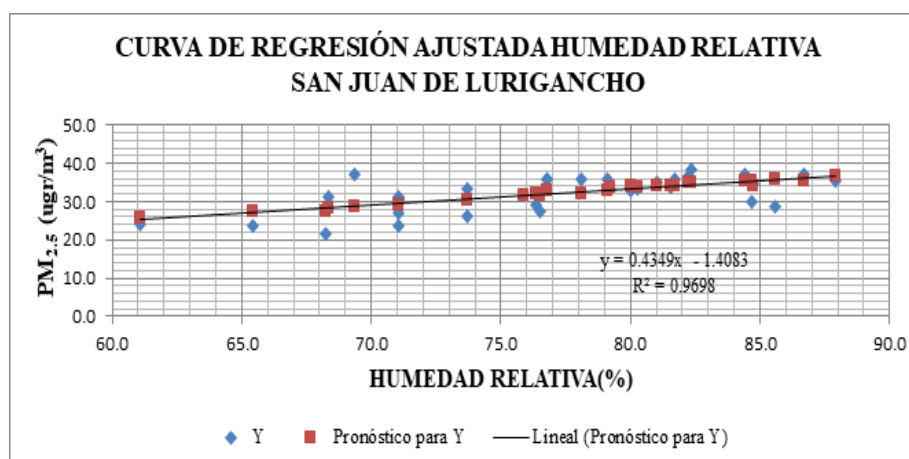
Curva de relación entre la velocidad de viento y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de San Juan de Lurigancho



Nota. Elaboración propia.

**Figura 44**

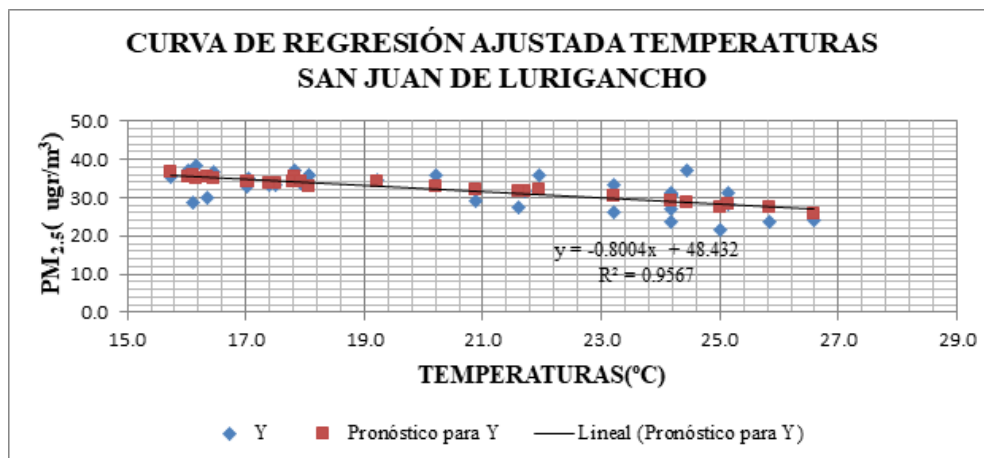
Curva de relación entre la humedad relativa y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de San Juan de Lurigancho



Nota. Elaboración propia.

**Figura 45**

Curva de relación entre la temperatura y concentración  $PM_{2.5}$  en el Distrito de San Juan de Lurigancho

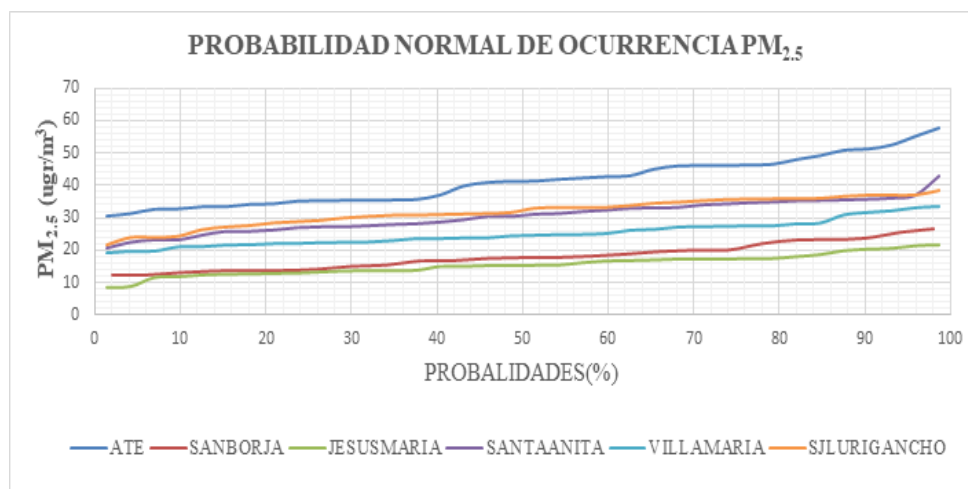


Nota. Elaboración propia.

**Figura 46**

Curva de relación entre la probabilidad de ocurrencia de material particulado  $PM_{2.5}$  y la concentración

$Pm_{2.5}$



Nota. Elaboración propia.

### **4.3 Variación diaria de los Vientos locales predominantes y la relación con la concentración de $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana en el año 2017. Así mismo, las condiciones sinópticas predominantes.**

#### ***4.3.1 Comportamiento diario de la dirección de los vientos predominantes y las concentraciones de $PM_{2.5}$ , en las nueve estaciones monitoreadas en Lima Metropolitana.***

Se describió los resultados del análisis de la Rosa de Viento de las estaciones de calidad de aire del SENAMHI: ATE, SBJ, CDM, STA, VMT, HUH, SJL, SMP y PPD, relacionándolos con las mayores concentraciones de  $PM_{2.5}$  en este periodo de estudio.

#### **ATE**

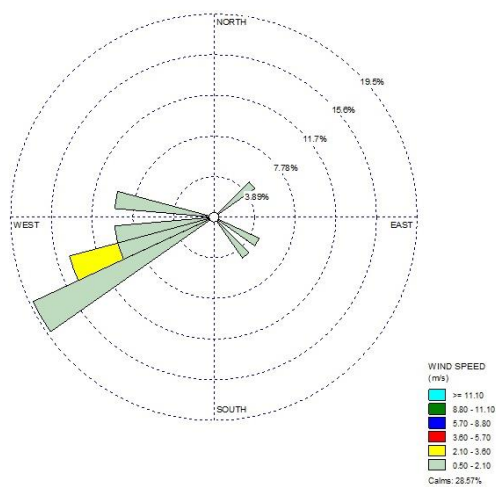
La estación ATE presentó los meses con mayor concentración de  $PM_{2.5}$  en junio y agosto, los picos más altos de junio fueron los días 13, 14 y 15 con una concentración de 83, 76 y 82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

El segundo mes fue agosto, presentando los picos de mayor concentración de  $PM_{2.5}$  los días 22, 23 y 26 con 70,1, 61,6 y 78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

En la Figura 47, se observó para el día 13 de junio, que los vientos más frecuentes fueron del SW y WSW, este último con la mayor velocidad de viento.

### Figura 47

Vientos frecuentes en ATE el día 13 de junio con una concentración de  $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$

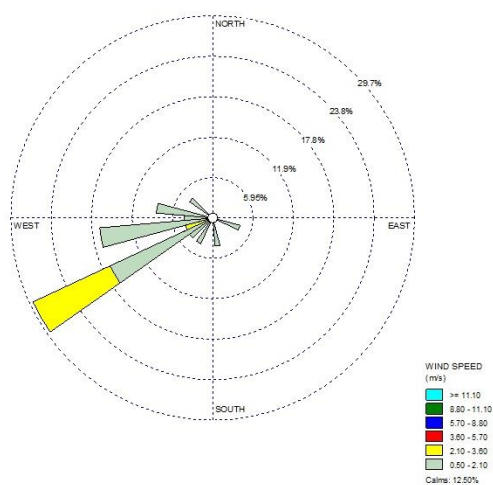


Nota. Elaboración propia.

Figura 48, se observó para el día 14 de junio, que los vientos más frecuentes fueron del SW (mayor velocidad de viento) y WSW.

### Figura 48

Vientos frecuentes en ATE el día 14 de junio con una concentración de  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$

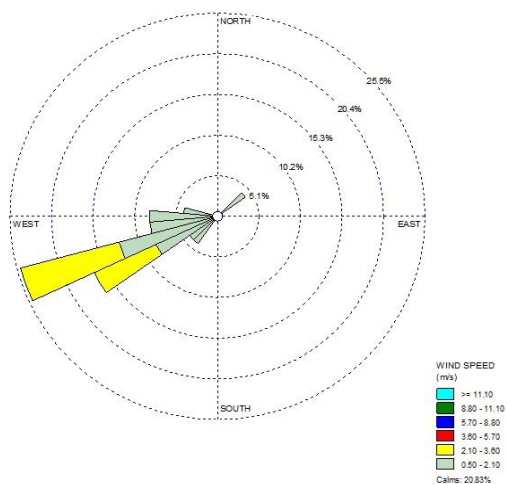


Nota. Elaboración propia.

En la figura 49, se observó para el día 22 de agosto, que los vientos más frecuentes fueron del WSW con mayores velocidades de viento.

**Figura 49**

Vientos frecuentes en ATE el día 22 de agosto con una concentración de  $70,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$



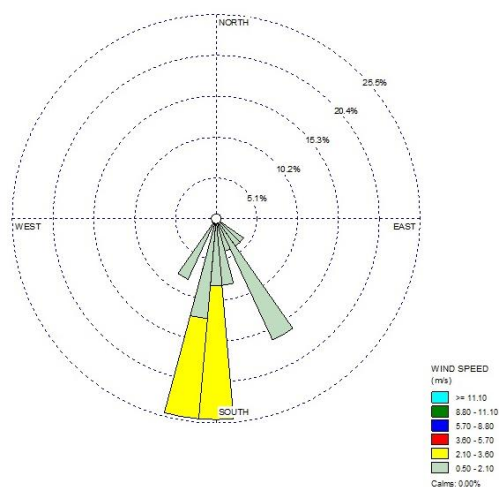
Nota. Elaboración propia.

### SBJ

La estación SBJ presentó el mes con mayor concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en agosto, el pico más alto fue el día 22 con una concentración de  $34,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la figura 50 se observó para el día 22 de agosto, que los vientos más frecuentes fueron del S (mayor velocidad de viento) y SSE.

**Figura 50**

Vientos frecuentes en SBJ el día 22 de agosto con una concentración de  $34,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$



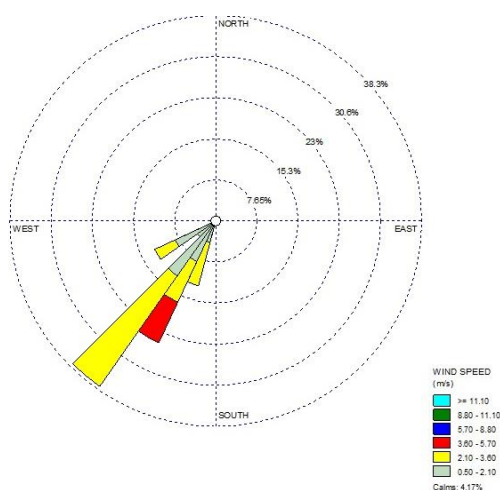
Nota. Elaboración propia.

## CDM

La estación CDM presentó el mes con mayor concentración de  $PM_{2.5}$  en setiembre, el pico más alto fue el día 18 con una concentración de  $35,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la Figura 51 se observa para el día 18 de setiembre, que los vientos más frecuentes fueron del SW (mayor velocidad de viento) y SSW.

### **Figura 51**

*Vientos frecuentes en CDM el día 18 de setiembre con una concentración de  $35,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$*



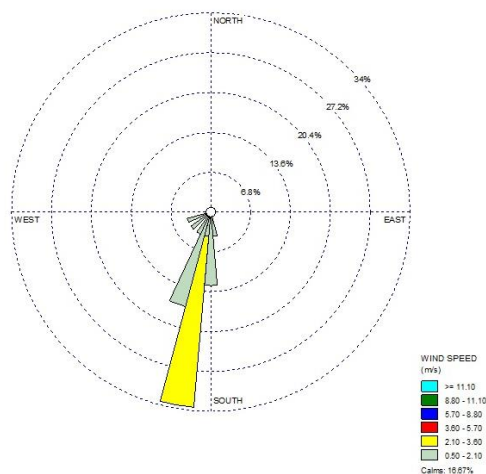
*Nota.* Elaboración propia.

## STA

La estación STA presentó el mes con mayor concentración de  $PM_{2.5}$  en agosto, el pico más alto fue el día 22 con una concentración de  $61,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la figura 52 se observó para el día 22 de agosto, que los vientos más frecuentes fueron del S (mayor velocidad de viento) y SSW.

## Figura 52

Vientos frecuentes en STA el día 22 de agosto con una concentración de  $61,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$



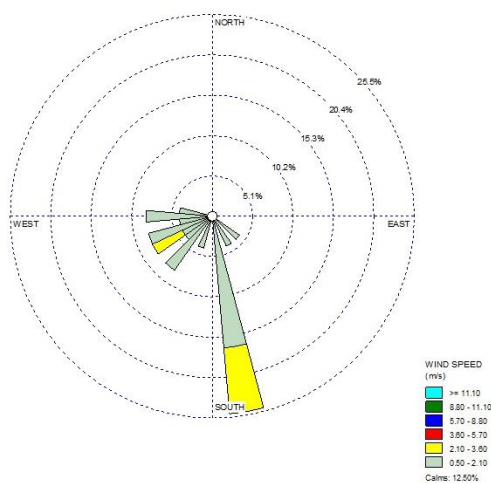
Nota. Elaboración propia.

## VMT

La estación VMT presentó el mes con mayor concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en setiembre, el pico más alto fue el día 18 con una concentración de  $53,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la Figura 53 se observó para el día 18 de setiembre, que los vientos más frecuentes fueron del SSE (mayor velocidad de viento) y WSW.

**Figura 53**

Vientos frecuentes en VMT el día 18 de setiembre con una concentración de  $53,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$



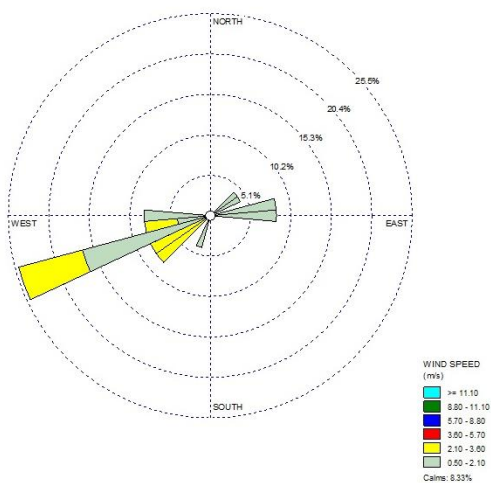
Nota. Elaboración propia.

## HCH

La estación HCH presentó el mes con mayor concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en junio, los picos más altos fueron los días 13 y 14 con una concentración de  $74,7$  y  $68,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. En la Figura 54 se observa para el día 13 de junio, que los vientos más frecuentes fueron del WSW (mayor velocidad de viento) y SW.

**Figura 54**

Vientos frecuentes en HCH el día 13 de junio con una concentración de  $74,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$



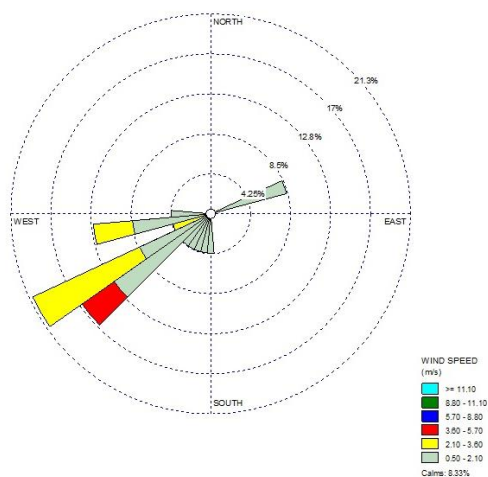
Nota. Elaboración propia.



En la figura 55, se observó para el día 14 de junio, que los vientos más frecuentes fueron del SW (mayor velocidad de viento) y SSW.

### Figura 55

*Vientos frecuentes en HCH el día 14 de junio con una concentración de  $68,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$*

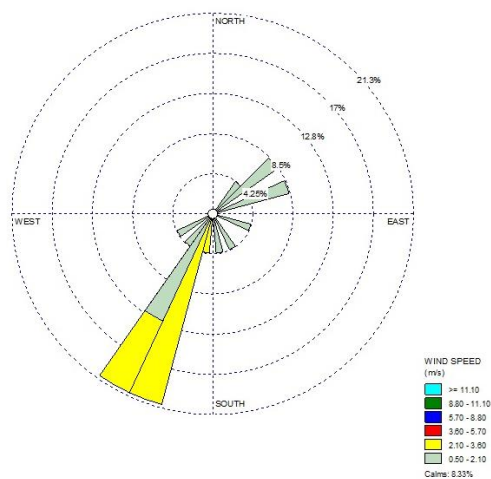


*Nota.* Elaboración propia.

### SJL

La estación SJL presentó los meses con mayor concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en junio y agosto, los picos más altos fueron los días 13 y 14 de junio con una concentración de  $54,2$  y  $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente y agosto el día 22 con una concentración de  $61,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la figura 56 se observó para el día 13 de junio, que los vientos más frecuentes fueron del SSW (mayor velocidad de viento)

**Figura 56** Vientos frecuentes en SJL el día 13 de junio con una concentración de  $54,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$

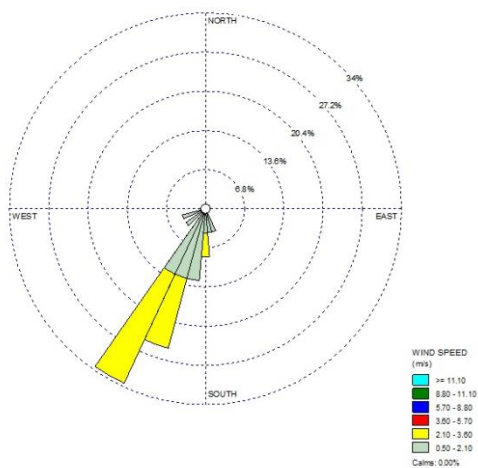


*Nota.* Elaboración propia.

En la figura 57 se observó para el día 14 de junio, que los vientos más frecuentes fueron del SW y SSW, con igual velocidad de viento.

**Figura 57**

Vientos frecuentes en SJL el día 14 de junio con una concentración de  $59,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$

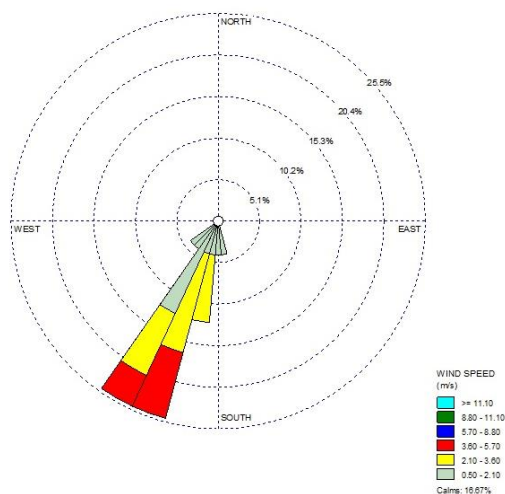


*Nota.* Elaboración propia.

En la figura 58 se observó para el día 22 de agosto, que los vientos más frecuentes fueron del SSW y S, con igual velocidad de viento.

**Figura 58**

Vientos frecuentes en SJL el día 22 de agosto con una concentración de  $61,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$



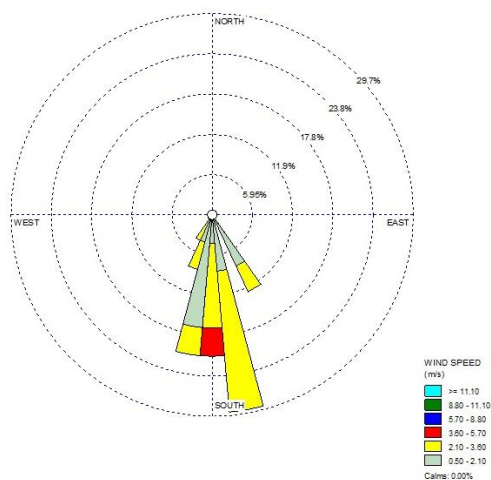
Nota. Elaboración propia.

## SMP

La estación SMP presentó el mes con mayor concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en agosto, el pico más alto fue el día 22 con una concentración de  $36,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la Figura 59, se observó para el día 22 de agosto, que los vientos más frecuentes fueron del SSE (mayor velocidad de viento) y S.

**Figura 59**

Vientos frecuentes en SMP el día 22 de agosto con una concentración de  $36,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$



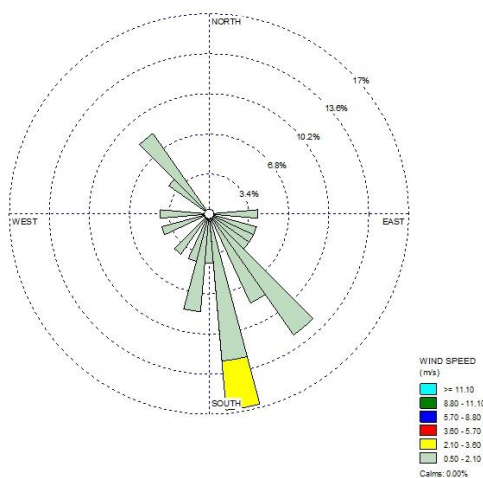
Nota. Elaboración propia.

## PPD

La estación PPD presentó dos meses con mayor concentración de  $PM_{2.5}$  en junio y agosto, los picos más altos fueron el 14 de junio con una concentración de  $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y agosto el día 22 con una concentración de  $49,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la figura 60 se observó para el día 14 de junio, que los vientos más frecuentes fueron del S (mayor velocidad de viento) y SE.

### **Figura 60**

*Vientos frecuentes en PPD el día 14 de junio con una concentración de  $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$*

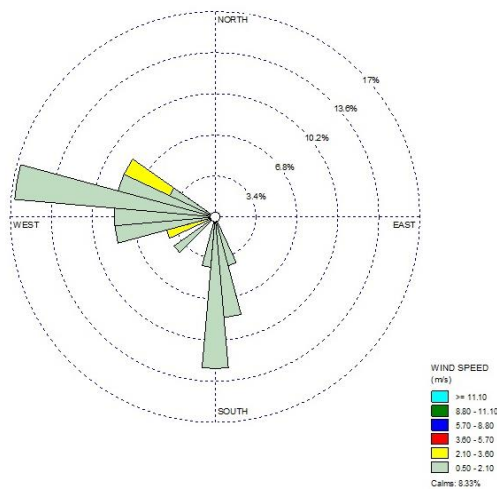


*Nota.* Elaboración propia.

En la figura 61 se observó para el día 22 de agosto, que los vientos más frecuentes fueron del WNW (mayor velocidad de viento) y S.

**Figura 61**

Vientos frecuentes en PPD el día 22 de agosto con una concentración de  $49,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Nota. Elaboración propia.

#### 4.3.2 Condiciones sinópticas predominantes

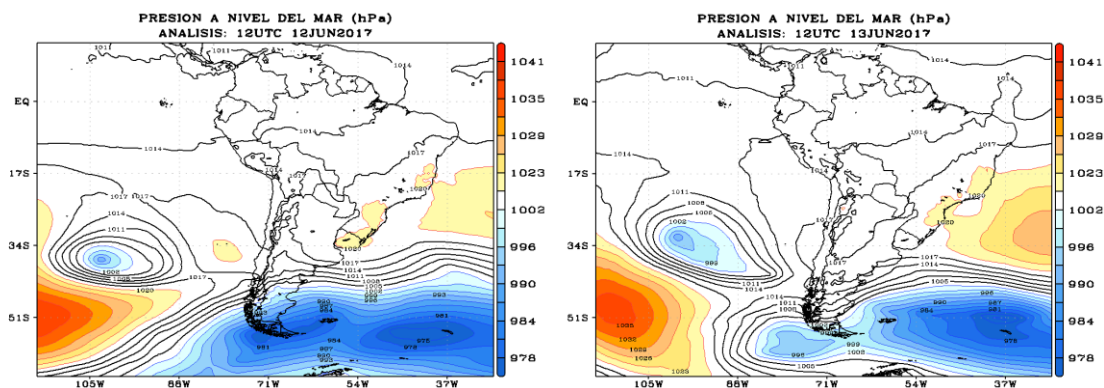
Se analizó el comportamiento atmosférico de los días con mayor concentración de  $\text{PM}_{2.5}$ , en niveles representativos de la atmosfera, desde la superficie hasta los 12 000 m.

##### Anticiclón del Pacífico Sur (APS)

Presentó tres días con altas concentraciones  $\text{PM}_{2.5}$ , 13, 14 y 15. La ubicación del APS, se encuentra alejado de su posición normal ( $30^{\circ}\text{S} - 90^{\circ}\text{W}$ ) en estos días, con tendencia a desplazarse al sur del continente. Ver Figuras 62 y 63. El día 16 el APS migró por el sur del continente. Ver Figura 64.

### Figura 62

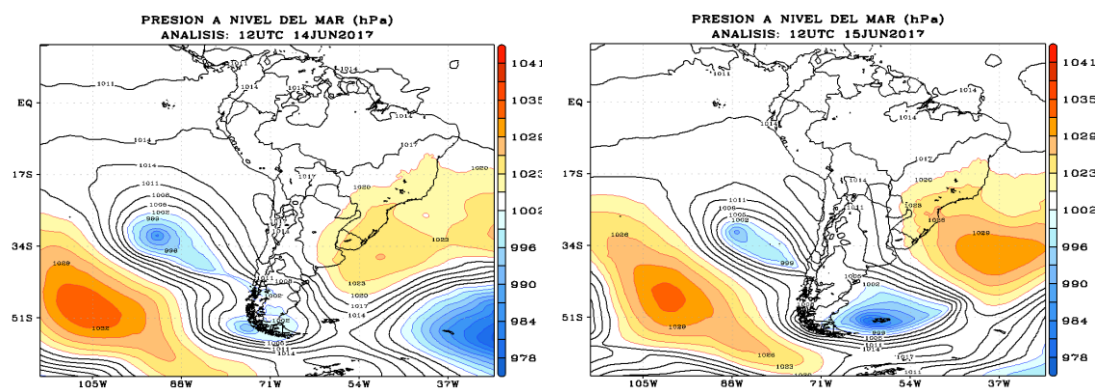
Ubicación del APS, antes y durante del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$



Nota. Elaboración propia.

### Figura 63

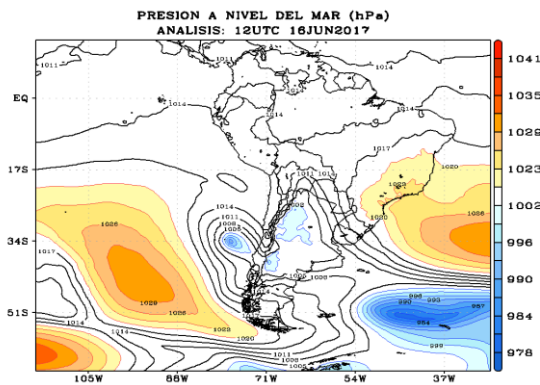
Ubicación del APS, durante los días con mayor concentración  $PM_{2.5}$



Nota. Elaboración propia.

### Figura 64

Ubicación del APS, después del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$



Nota. Elaboración propia.

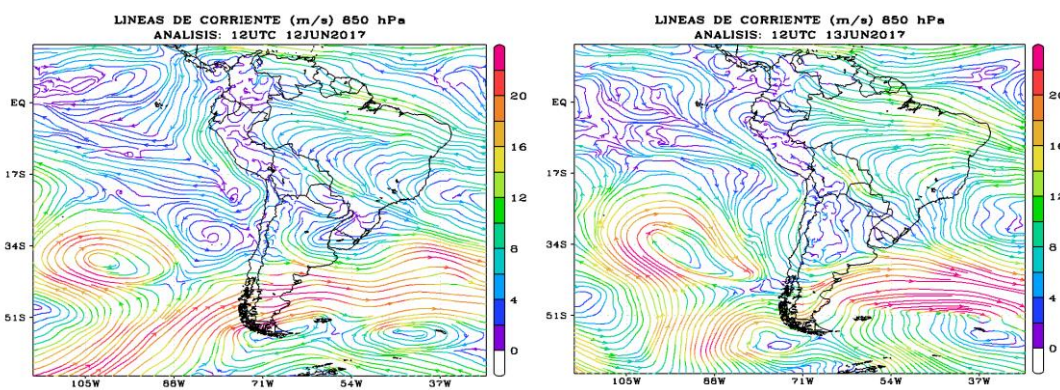
### Líneas de corriente a 850 hPa ( $\approx 1\ 500\ m$ )

Días 12 al 15 ingresaron a la costa vientos del norte, día 16 vientos costeros con dirección sur.

Ver figuras 65, 66 y 67.

#### **Figura 65**

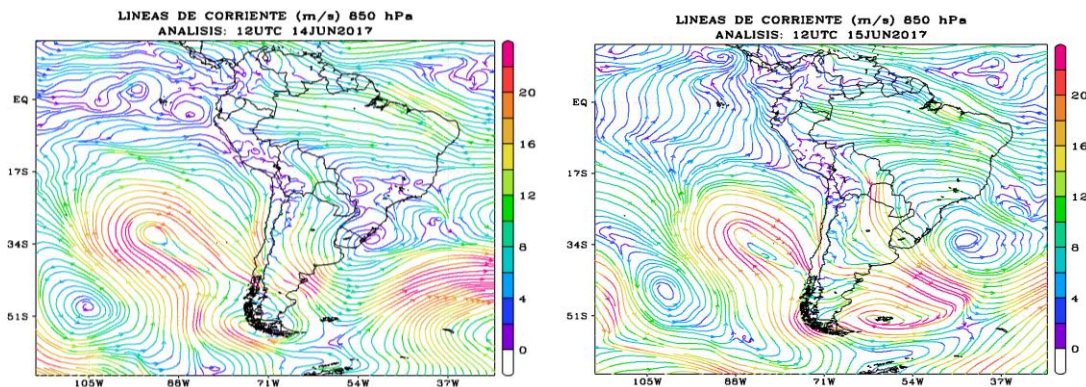
*Líneas de corriente a nivel 850 hPa, antes y durante del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



*Nota.* Elaboración propia.

#### **Figura 66**

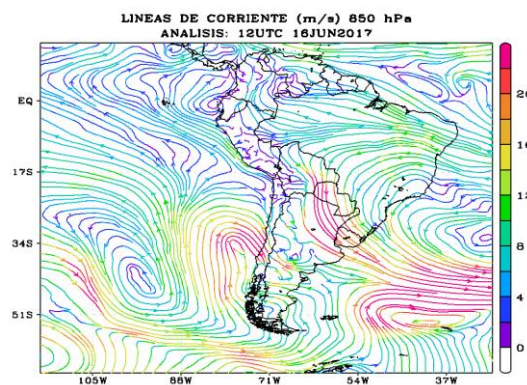
*Líneas de corriente a nivel 850 hPa, durante los días con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



*Nota.* Elaboración propia.

### Figura 67

*Líneas de corriente a nivel 850 hPa, después del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



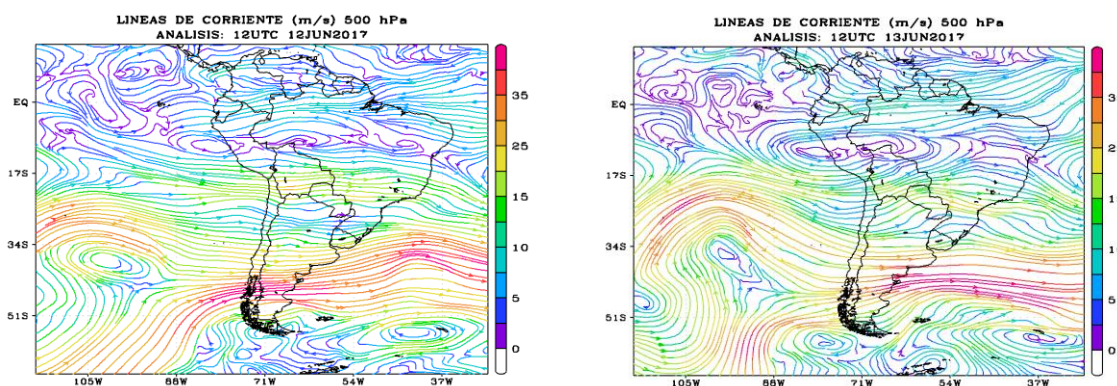
*Nota.* Elaboración propia.

### Líneas de corriente a 500 hPa (5 000 m)

Los días del 13 al 15 se observó un sistema sobre el territorio de giro anti horario. El día 16, el sistema no se encuentra sobre Perú. Ver Figuras del 68 al 70.

### Figura 68

*Líneas de corriente a nivel 500 hPa, antes y durante del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*

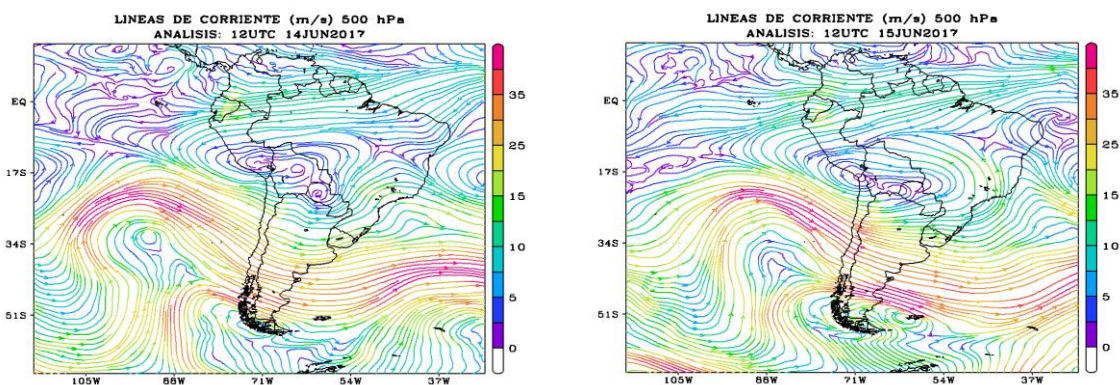


*Nota.* Elaboración propia.



### Figura 69

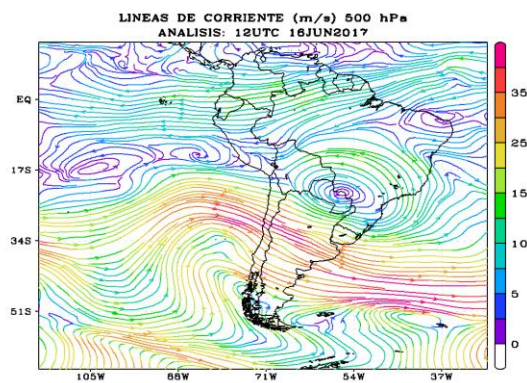
*Líneas de corriente a nivel 500 hPa, durante los días con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



*Nota.* Elaboración propia.

### Figura 70

*Líneas de corriente a nivel 500 hPa, después del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



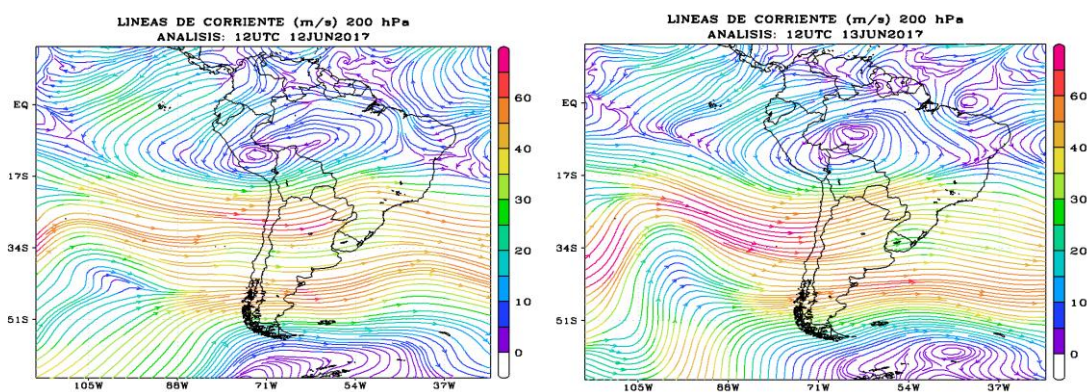
*Nota.* Elaboración propia.

### Líneas de corriente a 200 hPa (12 000 m)

Los días 12 al 15 se observó la formación de un sistema de giro anti horario con dominio sobre Perú. Día 16 se des configura. Ver figuras 71 al 73.

**Figura 71**

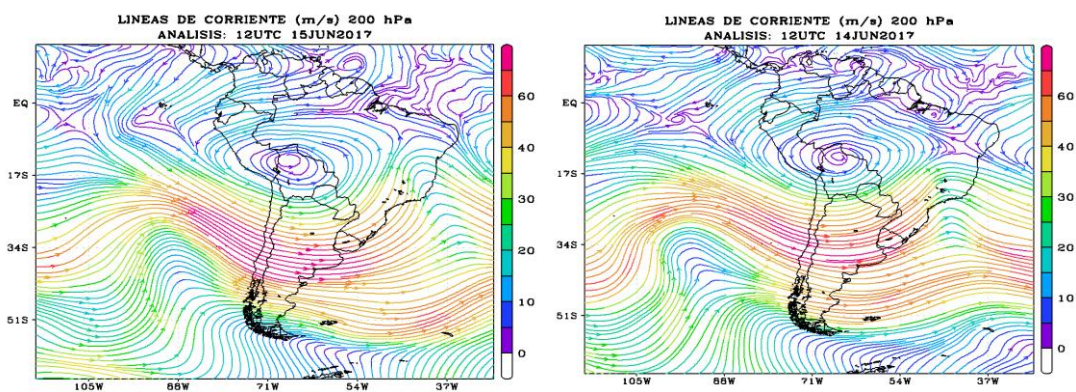
*Líneas de corriente a nivel 200 hPa, antes y durante del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 72**

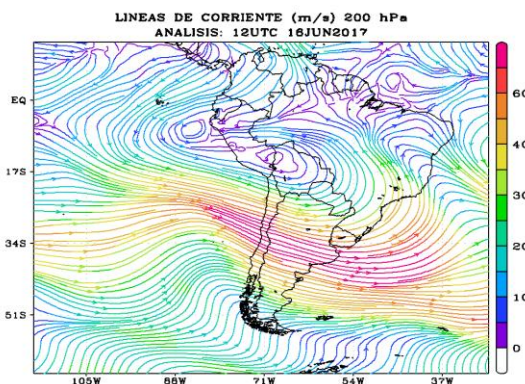
*Líneas de corriente a nivel 200 hPa, durante los días con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



*Nota.* Elaboración propia.

### Figura 73

*Líneas de corriente a nivel 200 hPa, después del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



*Nota.* Elaboración propia.

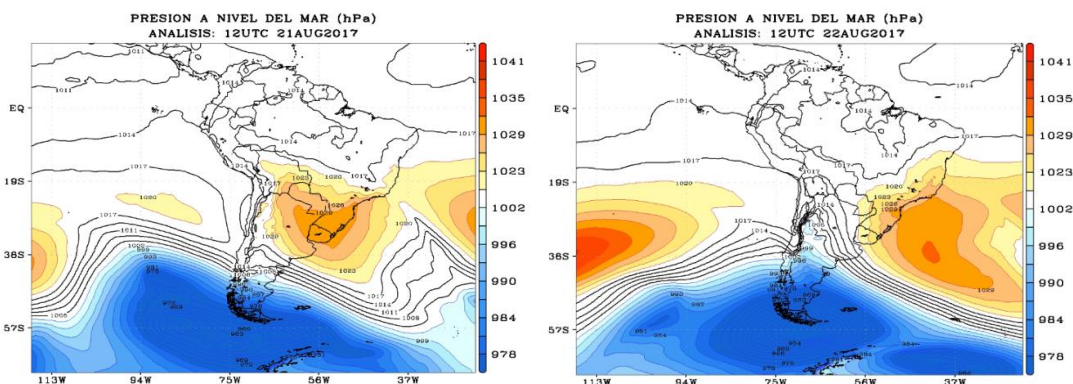
### Agosto

Anticiclón del Pacífico Sur (APS)

Día 22, se presentó mayor concentración de  $PM_{2.5}$ . La ubicación del APS, se encontró alejado de su posición normal ( $23^{\circ}\text{S} - 90^{\circ}\text{W}$ ). Ver Figura 74.

### Figura 74

*Ubicación del APS, antes y durante del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



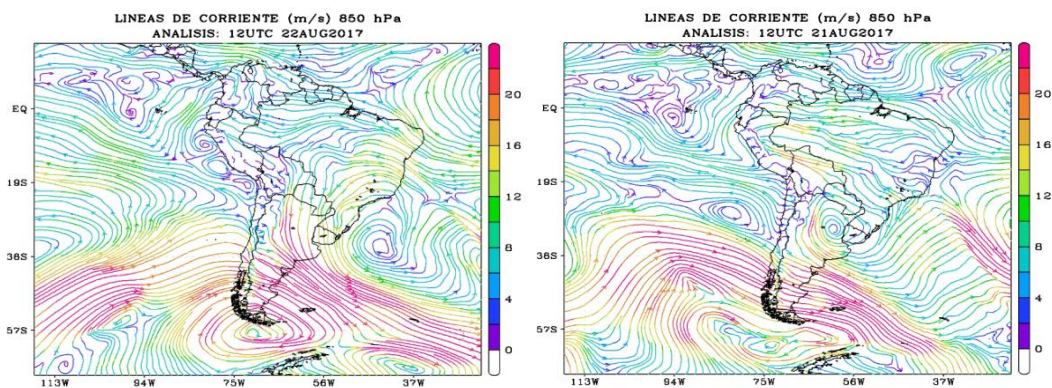
*Nota.* Elaboración propia.

Líneas de corriente a 850 hPa ( $\approx 1\ 500\ \text{m}$ )

Días 21 y 22 ingresaron a la costa vientos del norte. Ver Figura 75.

### Figura 75

*Líneas de corriente a nivel 850 hPa, durante los días con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



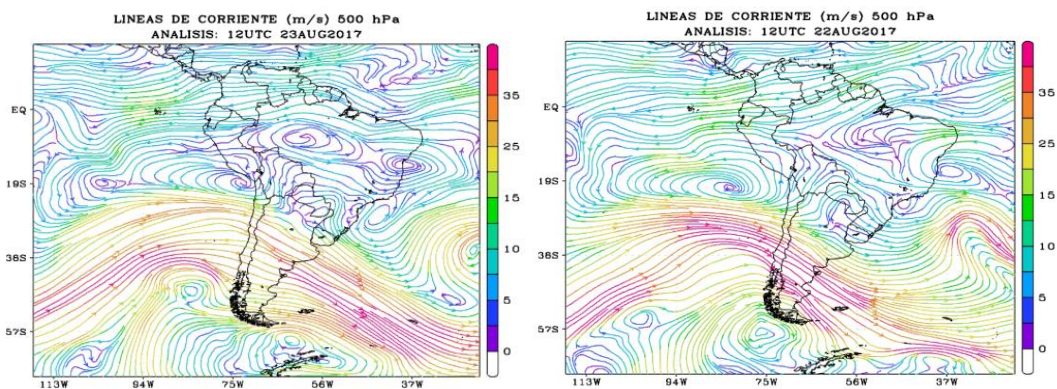
*Nota.* Elaboración propia.

### Líneas de corriente a 500 hPa ( $\approx 5\,000\text{ m}$ )

Día 22 se observó un sistema sobre el Pacífico de giro anti horario que también llegó al territorio, El día 23, con tendencia a des configurarse. Ver Figura 76.

### Figura 76

*Líneas de corriente a nivel 500 hPa, durante y después del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



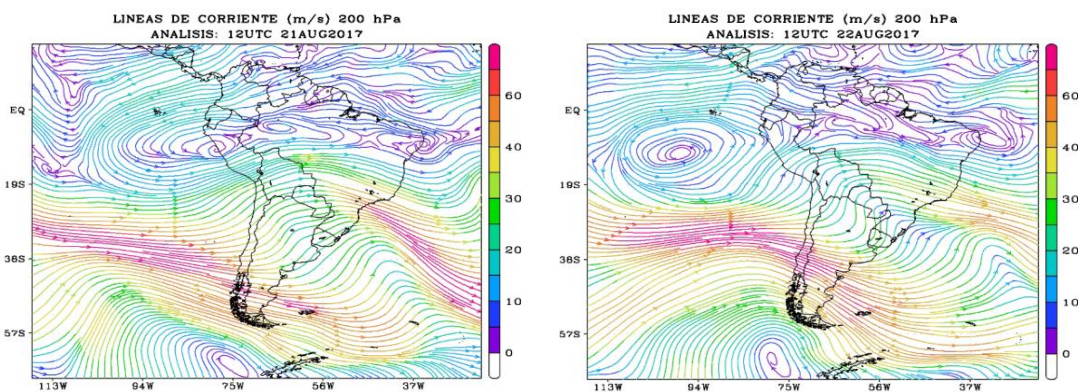
*Nota.* Elaboración propia.

### Líneas de corriente a 200 hPa ( $\approx 12\ 000\ m$ )

Día 21 y 22 se observó la formación de un sistema de giro anti horario sobre el Pacífico que también afectó norte y centro del territorio. Ver Figura 77.

#### **Figura 77**

*Líneas de corriente a nivel 200 hPa, antes y durante del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



*Nota.* Elaboración propia.

#### **4.3.3 Condiciones sinópticas año 2018**

El día que presentó mayor concentración de  $PM_{2.5}$  el año 2017, se analizó también en el año 2018. Ver Figura 78.

El APS tiene una configuración migrando a continente, un núcleo de 1 029 hPa (normal climático 1 023 hPa) y configuración meridional.

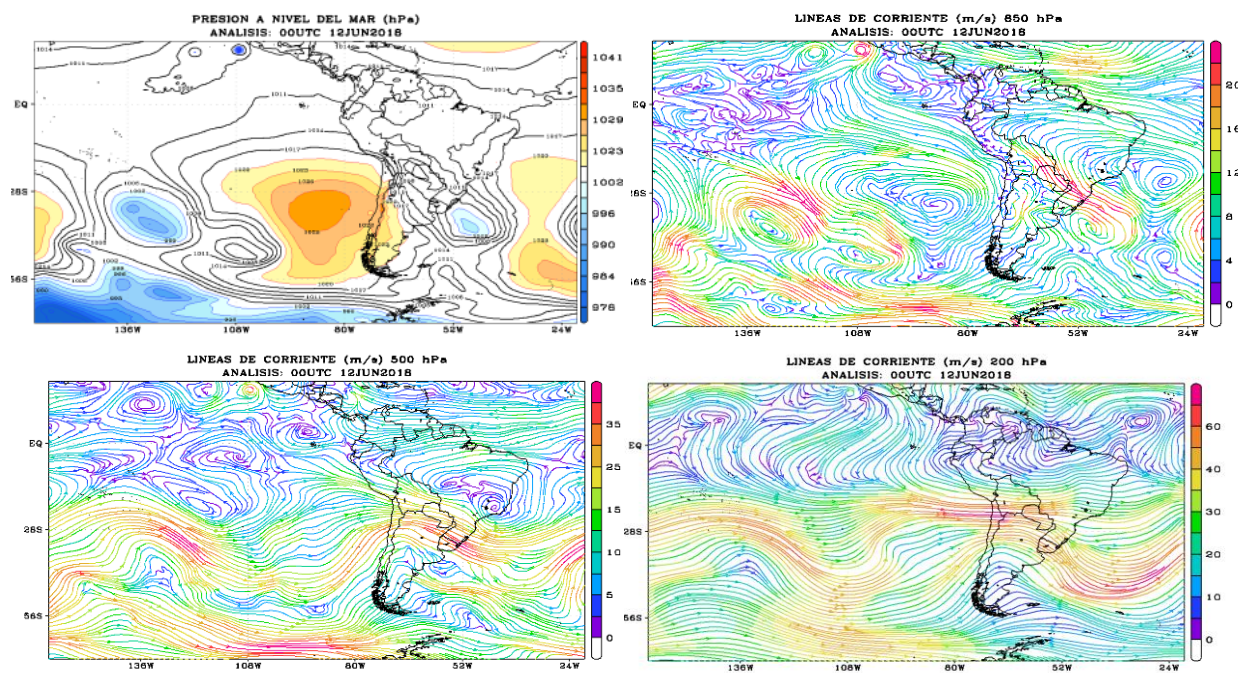
Nivel 850, predominan los flujos del sur

Nivel 500, predominan los flujos del noroeste

Nivel 200, predominan los flujos del noroeste

**Figura 78**

*Ubicación del APS, Líneas de corriente a nivel 850, 500 y 200 hPa año 2018, antes del día con mayor concentración  $PM_{2.5}$*



*Nota.* Elaboración propia.

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- La variación espacial y temporal de las estaciones monitoreadas en el ámbito de Lima Metropolitana relacionados al comportamiento de las concentraciones  $PM_{2.5}$  presentaron dos grupos diferenciados, en los doce meses de la investigación, ver Figura 14.
  - Las estaciones que superaron el Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire D.S. N 003-2017- MINAM para  $PM_{2.5}$  en 24 h con valores de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el estándar indicado por la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , estas fueron los distritos de ATE ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Santa Anita ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $67,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Villa María del Triunfo ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), San Juan de Lurigancho ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $71,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y Huachipa ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $74,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
  - Las estaciones que superaron solo los estándares de la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fueron: San Borja ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $34,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Jesús María ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $35,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), San Martín de Porras ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $36,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y Puente Piedra ( $PM_{2.5}$  diaria hasta de  $49,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
- Correlación decadal diaria de las variables meteorológicas y las concentraciones del  $PM_{2.5}$  en las estaciones monitoreadas en Lima Metropolitana.
  - Viento, la velocidad del viento es directamente proporcional con las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en las estaciones de invierno y primavera.
  - Temperatura del aire, este elemento meteorológico se comporta de manera inversamente proporcional con las concentraciones  $PM_{2.5}$  en verano y primavera.
  - Humedad relativa, se comporta de manera indiferente en las estaciones del año.
- Variación del promedio estacional de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en las estaciones de Lima Metropolitana.

- Las menores concentraciones de  $PM_{2.5}$  se presentaron en los meses de verano (siete estaciones) y en primavera (dos estaciones), Mientras que, las concentraciones mayores se presentaron en otoño (siete estaciones) y en invierno (dos estaciones).
- Las condiciones meteorológicas y su relación con las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , según las ecuaciones de regresión lineal.
  - Viento, las ecuaciones de regresión que relacionan viento con la concentración  $PM_{2.5}$  presentaron pendientes negativas, esto significa que las tendencias son inversamente proporcionales (a mayor viento menor concentración).
  - Temperatura el aire, las ecuaciones de regresión que relacionan temperatura con la concentración  $PM_{2.5}$  tienen tendencias inversamente proporcionales.
  - Humedad relativa, las ecuaciones de regresión que relacionan humedad relativa con concentración  $PM_{2.5}$ , presentan tendencias positivas o directamente proporcionales (mayor humedad relativa menor concentración).
- Los vientos locales y la mayor concentración del  $PM_{2.5}$  en el año 2017
  - Las concentraciones de  $PM_{2.5}$  mayores de cada estación monitoreada se relacionaron con las frecuencias de los vientos del mismo día, ver Tabla 5, se observó que los vientos más frecuentes fueron los meses de junio, agosto y setiembre predominando los vientos de los cuadrantes del sur y oeste. Las estaciones de ATE, STA, SJL, HCH y CDM tienen como direcciones predominantes el SW y las estaciones como SBJ, VMT, SMP Y PPD tienen como dirección predominante los componentes SE.



**Tabla 5**

*Concentraciones mayores de PM<sub>2.5</sub> y la relación con la dirección viento en el año 2017*

Meses	Viento	ATE	SBJ	CDM	STA	VMT	HCH	SJL	SMP	PPD
<b>Junio</b>		SW- WSW	-	-			WSW- SW	SSW		
							SW- SSW	SW- SSW		S-SE
<b>Agosto</b>		WSW	S- SSE		S- SSW			SSW- S	SSE- S	WNW -S
<b>Setiembre</b>				SW- SSW		SSE- WSW				

*Nota.* Elaboración propia.

- La salida del modelo nos apoyó a visualizar los sistemas sinópticos de los días con mayores concentraciones de PM<sub>2.5</sub>. APS alejado de continente favoreció a debilitar vientos de dirección sur, en niveles de 850 hPa ingreso de vientos del norte, niveles de 500 y 200 hPa formación sobre el territorio un sistema con giro anti horario favorable a la sequedad de la atmosfera.

## VI. CONCLUSIONES

- Se demostró que las condiciones meteorológicas influyen en la calidad del aire ambiental por  $PM_{2.5}$  a través de la discusión de resultados se verificó las convergencias con otras investigaciones.
- Se demostró que las concentraciones diarias  $PM_{2.5}$  se presentaron dos grupos diferenciados, en la investigación. Los que superaron los D.S. 003-2017-MINAM ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) fueron: ATE, Santa Anita, Villa María del Triunfo, Huachipa, San Juan de Lurigancho y los que solo superaron los estándares de la OMS ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ): San Borja, Jesús María, San Martín de Porras y Puente Piedra. La mayor concentración diaria  $PM_{2.5}$  se presentó los meses de junio, agosto y setiembre alcanzando niveles que superaron D.S. 003-2017-MINAM y la OMS.
- En la actualidad la tendencia del  $PM_{2.5}$  ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para algunos distritos de Lima Metropolitana continúan con una calidad de aire “Insalubre para grupos sensibles rojo”, distritos como Carabaylo, San Juan de Lurigancho, Santa Anita, ATE y Villa María del Triunfo. Asociados a las condiciones meteorológicas. Boletín Vigilancia de Calidad del Aire, 2022.

## VII. RECOMENDACIONES

- Las instituciones encargadas de las mediciones de concentraciones de  $PM_{2.5}$  deben incrementar el número de estaciones automáticas de calidad de aire, con la finalidad de contar con información que permita tener una mayor resolución y la interpolación sea más precisa en la ciudad de Lima.
- El tema de investigación realizado en esta tesis se extienda en otras ciudades del país, que presente problemas de contaminación con el  $PM_{2.5}$ , incluyendo la influencia de las variables meteorológicas de la zona.
- El análisis meteorológico sinóptico debe incorporarse a nivel diario con fin de generar patrones atmosféricos en relación a la concentración del  $PM_{2.5}$ .
- Seguir implementando estrategias para monitorear, evaluar y controlar la contaminación por  $PM_{2.5}$  en beneficio a la salud y del medio ambiente.

## VIII. REFERENCIAS

- Adani, M., Mircea, M., D'Isidoro, M., & Gualtieri, M. (2018). Impact of Emissions, Meteorology and Grid Resolution on Changes in HMs and Grid Resolution o Changes in HMs and PAHs Concentrations between 2005 and 2010 in Italy. *Aeresol and Air Quality Research*. <https://aaqr.org/articles/aaqr-17-08-0a-0262>
- Aemet. (2018). *Diccionario ilustrado de Meteorología*. Asociación Meteorológica Española.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (19 de enero de 2017). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*.  
doi:[https://www3.epa.gov/airnow/flag/air-quality-factsheet\\_SPA.pdf](https://www3.epa.gov/airnow/flag/air-quality-factsheet_SPA.pdf)
- Agencia Estatal de Meteorología. (23 de abril de 2018). *Meteo Glosario Visual Diccionario ilustrado de meteorología*. <https://meteoglosario.aemet.es/>
- Andrade, F., Orsini, C., & Maenhaut, W. (1994). *Relation between aerosol sources and meteorological parameters for inhalable atmospheric particles in Sao Paulo City, Brazil*. Elsevier (Sao Paulo). [http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90484-7](http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310(94)90484-7)
- Arciniégas Suárez, C. A. (enero - junio de 2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fraccion respirable PM10. *Luna Azul, ISSN 1909 - 2474*(34), 195 - 213.
- Arrieta Fuentes, A. J. (2016). Dispersión de material particulalado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrllo*, 52. [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/article/view/5445](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/5445)
- ASXlab. (18 de setiembre de 2015). *Factores que determinan el clima del Perú*. <https://asxlab.blogspot.com/2015/09/factores-que-determinan-el-clima-del.html>

- Ballester Díez, F., & Tenías, J. M. (marzo - abril de 1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 109 -121.  
[https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S113557271999000200002&script=sci\\_abstract&tlng=es](https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S113557271999000200002&script=sci_abstract&tlng=es)
- EPA. (2017). *Contaminación del aire*. <https://espanol.epa.gov/espanol/aire#contaminacion>
- Fernandez-Bremauntz, A., & Ashmore, M. (1995). *Exposure of commuters to carbon monoxide in Mexico city—I. Measurement of in-vehicle concentrations*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135223109400248J?via%3Dihub>
- Fuenzalida, H., Sánchez, R., & Garreaud, R. (2005). A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research*.  
[http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/cols\\_climo\\_JGR.pdf](http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/cols_climo_JGR.pdf)
- García-Reynoso, J. (2009). *Influencia de la meteorología en la calidad del aire en la zona metropolitana del valle de México*. Scielo (Ciudad de Mexico).  
<https://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v12n2/1405-888X-tip-12-02-83.pdf>
- Garreaud, R. D., & Rutllant, J. (2006). *Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago*. Colección de Química Ambiental (Santiago).  
[http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/Libro\\_CA.pd](http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/Libro_CA.pd)
- Godoy, A., Possia, N., Campetella, C., & Skabar, Y. (s.f.). *A cut-off low in southern South America: dynamic and thermodynamic processes*. Scielo (Brasil).  
<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/sLGp8ffTmbPZGcLgdX5szFj/?lang=en>
- Lecha, L. (2015). *Tiempo y Salud en el Caribe*. Researchgate (Cuba).  
[https://www.researchgate.net/publication/281100439\\_Clima\\_tiempo\\_y\\_salud\\_en\\_el\\_Caribe](https://www.researchgate.net/publication/281100439_Clima_tiempo_y_salud_en_el_Caribe)

- Martín Estévez, D., Lecha Estela, L. B., Olcina Cantos, J., & FDEZ De Arróyabe Hernández, P. (12 de Octubre de 2012). *Clasificación compleja y objetiva de los estados del tiempo diarios según la estructura del régimen térmico del aire y otros indicadores biométricos*. <https://studylib.es/doc/7637138/clasificaci%C3%B3n-compleja-y-objetiva-de-los-estados-del-tiempo>
- MINAM. (s.f.). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014*. Dirección General de Calidad Ambiental, Lima. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/>
- Ministerio de Salud. (s.f.). *Análisis de Situación de Salud*. <https://www.dge.gob.pe/portalnuevo/publicaciones/analisis-de-situacion-de-salud-asis/#:~:text=ASIS%20Nacional,Boletines&text=El%20An%C3%A1lisis%20de%20Situaci%C3%B3n%20de,con%20los%20procesos%20de%20planificaci%C3%B3n>.
- Ministerio del ambiente. (2005). *Ley General del ambiente - Ley N 28611*. Lima. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2013). *Informe Nacional de la Calidad del Aire*. Lima. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Informe-Nacional-de-Calidad-del-Aire-2013-2014.pdf>
- Monsalve Irusta, F. (2011). *Influencia del tiempo y de la contaminación atmosférica sobre enfermedades de los sistemas Circulatorio Y Respiratorio en Castilla-La Mancha*. León. <https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/1761>
- Montesinos, A., & Aceituno, P. (2002). *Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies*. Universidad de Chile (Santiago). [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/126006/Montecinos\\_Aldo.pdf?sequence=1](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/126006/Montecinos_Aldo.pdf?sequence=1)

- Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra.  
[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf?%20sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?%20sequence=1)
- Organización Panamericana de la Salud. (s.f.). *Calidad del Aire Ambiente*.  
<https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire/calidad-aire-ambiente>
- Peñate, I., Cianca, A., Ellis, A., & Selover, N. (2008). Transporte de aerosoles de origen desértico a diferente escala espacio-temporal, relación con perturbaciones tropicales. 30<sup>a</sup> *Jornadas Científicas de la AME*.  
<https://pub.ameweb.org/index.php/JRD/article/view/2145/2360>
- Pope III, C. A., Burnett, R. T., & Thun, M. J. (6 de marzo de 2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11879110/>
- Próspero, J. (1999). *Mediciones a largo plazo del transporte de polvo mineral africano al sureste de Estados Unidos: implicaciones para la calidad del aire regional*. Universidad de Miami.
- Puliafito, E., Castro, F., & Allende, D. (2009). *Transporte y calidad del aire en Mendoza*. Mendoza.  
[http://www1.frm.utn.edu.ar/ceds/Archivos/INF\\_N3\\_TRANSP\\_CEDS\\_UTN.pdf](http://www1.frm.utn.edu.ar/ceds/Archivos/INF_N3_TRANSP_CEDS_UTN.pdf)

- Quero, X., Viana, M., Alastuey, A., & Moreno, T. (2019). *Niveles, composición y fuentes de PM10 y PM2.5 en España: Aragón, Asturias, Castilla La Mancha, y Madrid*. Madrid. [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Informe+niveles+y+quimica\\_entregado2013-1-\\_tcm30-187876.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Informe+niveles+y+quimica_entregado2013-1-_tcm30-187876.pdf)
- Ramos et al. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, Mexico. *Universidad y Ciencia*, 66-76.
- Rodríguez, L. (16 de abril de 2013). *Globos atmosféricos monitorean cambio climático*. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2013/04/16/globos-atmosfericos-monitorean-cambio-climatico.html>
- Rodríguez, R., Benito, A., & Portela, A. (2004). *Meteorología y Climatología*. España. <https://escueladeaviadores.es/wp-content/uploads/2020/04/Meteorologia.pdf>
- Rutllant, J., & Fuenzalida, H. (1991). Synoptic Aspects of the Central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 63-76. [http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/OTHERS/Rutllant\\_Fuenzalida\\_2001.pdf](http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/OTHERS/Rutllant_Fuenzalida_2001.pdf)
- Sánchez, O., & Ordoñez, C. (2016). *Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2015*. Lima. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/126>
- Sierra Urrego , M. M. (2006). *Establecer la asociación existente entre las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y precipitación y las concentraciones de PM10 registradas en la red de calidad del aire de Bogota D.C*. Universidad de la Salle (Bogotá D.C.). [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1458&context=ing\\_ambiental\\_s](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1458&context=ing_ambiental_s)



añitaria

Silva Cotrina, J., & Montoya Cabrera, Z. (2004). *Análisis de la relación entre el comportamiento estacional de los contaminantes sólidos sedimentables con las condiciones Meteorológicas Predominantes en La Zona Metropolitana De Lima-Callao durante el año 2004*. Scielo (Lima).

[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892006000100017](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892006000100017)