

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Evaluación de la exposición al material particulado (PM 2.5) y
el riesgo de mortalidad, en la población adulta de Lima Centro -
2019**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Luis Magover Fernandez Fernandez

Nelson Rony Tito Tenorio

Asesor:

Ing. Dario Ccaccya Ccaccya

Lima, febrero de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS


Yo Dario Ccaccya Ccaccya, de la Facultad Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Evaluación de la exposición al material particulado (PM 2.5) y el riesgo de mortalidad, en la población adulta de Lima Centro – 2019”** constituye la memoria que presentan los Bachilleres Fernandez Fernandez, Luis Magover y Tito Tenorio, Nelson Rony para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 03 días del mes de marzo del año 2022.



Dario Ccaccya Ccaccya

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los **10 días** día(s) del mes de **febrero** del año 2022 siendo **las 16:30 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga**, el secretario: **Mg. Joel Hugo Fernandez Rojas**, y los demás miembros: **Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio** y el **Ing. Orlando Alan Poma Porras**, y el asesor **Ing. Dario Ccaccya Ccaccya**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Evaluación de la exposición al material particulado (PM 2.5) y el riesgo de mortalidad, en la población adulta de Lima Centro – 2019"

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **LUIS MAGOVER FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ**

.....b) **NELSON RONY TITO TENORIO**

conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

(Nombre del Título profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **LUIS MAGOVER FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

Candidato (b): **NELSON RONY TITO TENORIO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente
 Mg. Milda Amparo
 Cruz Huaranga



 Secretario
 Mg. Joel Hugo
 Fernandez Rojas

 Asesor
 Ing. Dario Ccaccya
 Ccaccya

 Miembro
 Mg. Jackson Edgardo
 Perez Carpio

 Miembro
 Ing. Orlando Alan
 Poma Porras

 Candidato/a (a)
 Luis Magover
 Fernández Fernández

 Candidato/a (b)
 Nelson Rony
 Tito Tenorio

Evaluación de la exposición al material particulado (PM 2.5) y el riesgo de mortalidad, en la población adulta de Lima Centro - 2019.

Evaluation of exposure at particulate matter (PM 2.5) and the risk of mortality, in the adult population of Lima Center – 2019.

Luis Magover FERNANDEZ FERNANDEZ*, Nelson Rony TITO TENORIO

**EP, Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana
Unión - Lima, Perú*

* Autor para correspondencia: luismagover12@gmail.com

Resumen

El artículo presenta un análisis del Material Particulado menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) presentes en el aire y la fracción de este agente que ingresan al organismo humano adulto en 5 distritos del núcleo urbano de Lima Centro a lo largo del mes de febrero y agosto de 2019. Para este estudio se usó el registro de la estación Campo de Marte, ya que es la única estación que cumplió con el 75% de representatividad, por lo que se trabajó con los datos de esta. Se establecieron escenarios de horas de exposición y no exposición al $PM_{2.5}$ distribuidos a lo largo de las 24 horas del día según los niveles de actividad de la población de la ciudad, obteniéndose que las horas de no exposición al aire presentan mayores niveles de concentraciones potenciales de $PM_{2.5}$ que podrían ingresar al organismo a diferencia de las horas en las que sí está expuesta una persona adulta al $PM_{2.5}$. Se compararon las dosis de $PM_{2.5}$ que ingresa al organismo en ambos meses concluyendo que en horas de exposición al $PM_{2.5}$ es un 140% más dañino para la salud de los ciudadanos en el mes de agosto que en febrero poniendo en riesgo a casi medio millón de personas (471 390 habitantes). El índice de calidad del aire en el mes de febrero y la concentración diaria más próximo al rango autorizado (50 ug/m^3) se registró el día 12 de febrero ($15,28 \text{ ug/m}^3$), y la calidad del aire para el mes agosto fue de mala por lo tanto se tiene que obviar cualquier tipo de deporte al aire libre y la concentración diaria más próximo al rango admitido se obtuvo el día 14 de agosto ($47,78 \text{ ug/m}^3$). Asimismo, el índice de riesgo para la salud de los habitantes en el mes de febrero es inferior al límite seguro y el índice de riesgo para el mes de agosto se encuentra por encima del límite seguro.

Palabras claves: concentración, dosis, exposición, escenarios, material particulado.

Abstract

The article presents an analysis of the Particulate Material less than 2.5 micrometers (PM_{2.5}) present in the air and the fraction of this agent that enters the adult human body in 5 districts of the urban center of Lima Centro throughout the month of February and August 2019. For this study, the record of the Campo de Marte station was used, since it is the only station that met 75% representativeness, so we worked with its data. Scenarios of hours of exposure and non-exposure to PM_{2.5} distributed throughout the 24 hours of the day were established according to the activity levels of the city's population, obtaining that the hours of non-exposure to the air present higher levels of concentrations. PM_{2.5} potentials that could enter the body, unlike the hours in which an adult person is exposed to PM_{2.5}. The doses of PM_{2.5} that enter the body in both months were compared, concluding that in hours of exposure to PM_{2.5} it is 140% more harmful to the health of citizens in the month of August than in February, putting at risk almost half a million people (471,390 inhabitants). The air quality index for the month of February and the daily concentration closest to the authorized range (50 ug/m³) was recorded on February 12 (15.28 ug/m³), and the air quality for the month August was bad, therefore, any type of outdoor sport must be avoided and the daily concentration closest to the allowed range was obtained on August 14 (47.78 ug/m³). Likewise, the risk index for the health of the inhabitants in the month of February is below the safe limit and the risk index for the month of August is above the safe limit.

Keywords: concentration, dose, exposure, scenarios, particulate matter, air quality.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de la atmosfera es una de las dificultades ambientales más severas a nivel global, según la Organización Mundial de la Salud nueve de cada diez personas respiran aire contaminado (OMS, 2018), esto se da mediante la presencia de agentes contaminantes en el aire que proceden de la naturaleza y de las diferentes actividades humanas, principalmente debido a la industrialización y el crecimiento urbano (Khaniabad et al., 2018), esto genera una interacción directa entre el material particulado y el organismo humano, produciendo efectos en la salud (Romero., et al 2016). Un número mayor al 50% de la población mundial mora en metrópolis con indicadores altos de contaminantes presentes en el aire (OMS, 2014), el material particulado se encuentra catalogado como uno de los agentes de mayor importancia por sus efectos en la salud humana (OMS, 2005), tiene origen natural como antrópico y tiene efectos en la calidad del aire que respiramos. Los orígenes de contaminación de $PM_{2.5}$ a nivel mundial, provienen por la utilización de combustibles fósiles que contienen azufre, y de los oxidantes fotoquímicos constituidos en la atmósfera por consecuencia de las reacciones químicas complejas entre los hidratos de carbono, óxidos de nitrógeno y las emisiones vehiculares (MINAM, 2014). Además, estas partículas también tienen su origen en la cubierta terrestre, polvo de las carreteras y la industria (MINAM, 2014).

La OMS evaluó la contaminación atmosférica por PM_{10} y $PM_{2.5}$ en mil seiscientas ciudades de noventa y un estados, donde se concluyó que, la ciudad de Lima es una de las ciudades con los más graves índices de material particulado de Latinoamérica (OMS, 2014), esto se da porque el 80% de la contaminación del aire procede del parque automotor de las diferentes fuentes móviles y fijas, el aumento de la contaminación está asociada al crecimiento poblacional y al ligero desarrollo económico e industrial en nuestro país. Los contaminantes principales emitidos a la atmosfera en la ciudad de Lima son agentes físicos $PM_{2.5}$, PM_{10} y agentes gaseosos SO_2 , CO , NO_2 , O_3 , CO_2 (García et al., 2013). La presencia del $PM_{2.5}$ en la atmósfera, causa diversos efectos adversos en la vegetación, materiales y generan daños en salud de las personas (Arciniégas, 2012). El $PM_{2.5}$ fácilmente podría cruzar la oposición pulmonar e introducirse en el sistema sanguíneo. El impacto crónico de las partículas colabora con el riesgo de originar alteraciones cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón (OMS, 2018). Además, sus efectos, en algunos casos están relacionados con síntomas en el tracto respiratorio superior, como la bronquitis, asma, enfisema, reacciones alérgicas, congestión nasal, sinusitis, tos, fiebre, irritación de los ojos y entre otros, los mismos que requieren un tratamiento especial (Gaviria et al., 2011). La ciudad de Lima, concentra 9 674 755 de habitantes (INEI, 2020) de las cuales mueren alrededor de 2 300 personas anualmente en Lima Metropolitana a causa del $PM_{2.5}$ (Lizarraga Isla et al., 2019).

La concentración del material particulado depende de diferentes factores tales como la intensidad del tráfico, tipo de vehículos, la hora del día, meteorología y topografía (Negrete, 2019). En los últimos informes del (SENHAMI), se registra alto grado de concentración de $PM_{2.5}$ en la estación San Juan de Lurigancho estación perteneciente a la red de estaciones de Lima Metropolitana, se registró picos altos que oscilan entre 53 y 82.5 ug/m^3 ; dichos resultados sobrepasaron los valores establecidos Estándar de Calidad Ambiental para Aire en 25 distritos de Lima Metropolitana (Pacsi, 2016). Lima Metropolitana cuenta con diez estaciones de monitoreo de la calidad del aire, los cuales realizan el seguimiento de las concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , CO , O_3 y variables meteorológicas en tiempo real, la información que proporcionada por las redes de monitoreo es la base fundamental para el desarrollo y aplicación de políticas públicas que contribuyan con el ascenso de la calidad del

aire. El impacto de los contaminantes en la salud depende principalmente al tiempo de exposición de la población a los mismos.

A mediados del año 2017, se aprobó el Estándar de la Calidad Ambiental para Aire, mediante el D. S. N°003-2017-MINAM, en el cual se establece un rango para los contaminantes como el SO₂, NO₂, PM_{2.5} (MINAM, 2017). El ECA para Aire tiene como fin controlar la contaminación crónica por un periodo prolongado y sostenido (Rojas, 2017). Sin embargo, muy poco se ha trabajado para minorar a rangos aceptables en cuanto a la emisión de estas sustancias. A inicios de esta década se emitieron dos normas legales cuyo objetivo principal es el de disminuir los niveles de contaminación, pero hasta la fecha no se ha logrado reducir las emisiones. Como consecuencia, esta situación ha contribuido con el detrimento de la calidad del aire y sus postreros consecuencias en la salud (MINAM, 2014). En el eje temático 2 de la gestión de la calidad del aire de la Agenda de investigación del Ministerio del Ambiente 2013-2021 se plantea realizar estudios de investigación sobre la calidad de aire en zonas priorizadas con la intención de evaluar el riesgo que genera en la salud ambiental el material particulado y los gases provenientes de las actividades antropogénica y naturales (Ministerio del Ambiente, 2013).

En la ciudad de Bogotá, estudios como los de (Franco Gantiva, 2014) y (Rodríguez et al., 2016) han aplicado técnicas de evaluación de exposición personal al PM_{2.5} mediante la determinación de escenarios para posteriormente determinar la dosis o la cantidad a la cual un organismo está expuesto y que ingresa al organismo humano. Estas técnicas de evaluación de exposición al PM₂ contribuirán con el presente trabajo a realizar.

En este contexto, el objetivo de la investigación es evaluar el nivel de exposición al Material Particulado PM_{2.5} y el riesgo de mortalidad en la población adulta de Lima Centro durante el año 2019, comparando las concentraciones del PM_{2.5} obtenidas con las establecidas en las directrices de la guía de calidad del aire de la (OMS, 2021) y el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (MINAM, 2017). Este estudio nos permitirá conocer el nivel de exposición de la población adulta de Lima Centro al material particulado PM_{2.5} y el riesgo de mortalidad que conlleva el ingreso del contaminante en el organismo humano a través de las vías respiratorias.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lugar de estudio

El área de estudio de la presente investigación abarca específicamente 5 distritos de Lima Centro ya que, de las diez estaciones de monitoreo de calidad de aire de Lima Metropolitana, solo la estación Campo de Marte cuenta con un registro de datos de PM_{2.5} mayor al 75% para el periodo de análisis. La estación de monitoreo (CDM) se encuentra situada en el distrito de Jesús María en las coordenadas UTM Latitud 8664814 m Sur y Longitud 277592 m Este. En la **figura 1** se observa la localización de cada una de las 10 redes de monitoreo automático de la calidad de aire de Lima Metropolitana. Las temperaturas máxima en Lima Centro se dan en verano, las cuales llegan hasta los 25°C y en invierno la temperatura mínima es de 12 °C, la humedad relativa varía entre 80% y 88% (SENAMHI, 2015).



Figura 1: Localización de las Estaciones de Monitoreo de Lima y Callao.

Fuente: (SENAMHI, 2021).

Los ciudadanos adultos mayores de 18 años de los cinco distritos de Lima Centro para el año 2019 fue de 471390 habitantes, dicha población se encuentra distribuida de la siguiente:

Tabla 1

Población Adulta en los Distritos Cercanos a la Estación (CDM).

Distrito	18 a 69 años	70 años a más	Total
Jesús María	52 090	12 362	64 452
Breña	58 562	11 665	70 227
Cercado de Lima	184 539	34 492	219 031
Pueblo Libre	57 877	13 063	70 950
Lince	37 888	8 842	46 730
Total	390 956	80 434	471390

Fuente: INEI (2020).

2.2. Tratamiento estadístico

Para modelar la dirección y velocidad del viento se utilizó el software WRPLOT 8.0.2, para el estudio de los datos se utilizó el software R que es un lenguaje de programación creado para el análisis estadístico y gráfico de datos, y su paquete Openair está diseñado particularmente para la investigación de calidad de aire (Follos Pliego, 2012).

2.3. Selección de datos

La selección de los datos de la estación de monitoreo Campo de Marte se realizó de acuerdo al método de monitoreo orientado a la prevención y/o evaluación de riesgos en la salud ambiental del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire (MINAM, 2019), donde se establece que para realizar estudios de calidad de aire se tiene que tener como mínimo el 75% del total de datos a evaluar. La estación de monitoreo registro los datos del (PM_{2.5} de forma horaria durante 24 horas por los 12 meses del año 2019 de manera continua. Los datos que presentaron periodos de horas no registradas fueron despreciados, se seleccionaron los datos correspondientes al material particulado menor a 2.5 micrómetros.

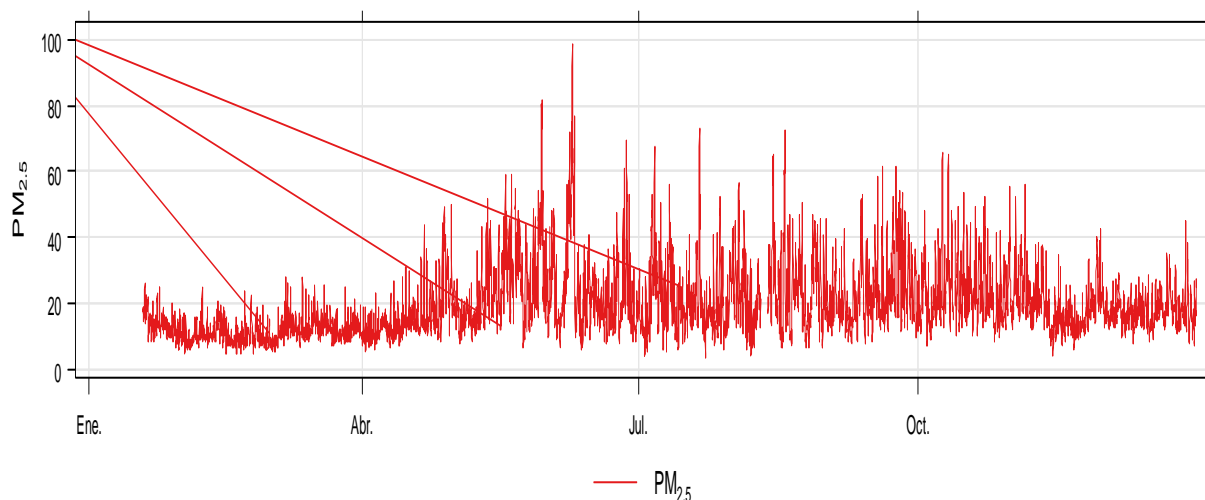


Fig. 2: Distribución horaria de la variación del PM_{2.5} durante el año 2019.

En la **fig. 2** se contempla la variación temporal de las concentraciones en el aire (ug/m³) del material particulado 2.5, durante el año 2019, se observa una falta de registros de algunos días de enero los cuales no interfirieron en la selección de los periodos de análisis. A partir de estos datos se establecieron 2 escenarios de análisis febrero y agosto debido a las condiciones meteorológicas diferentes en ambos meses, siendo febrero un mes representativo de la estación de verano presentando las mayores temperaturas del aire y velocidades de viento, y siendo agosto el mes representativo de la estación de invierno presentando las menores temperaturas del aire y velocidades del viento mínimas.

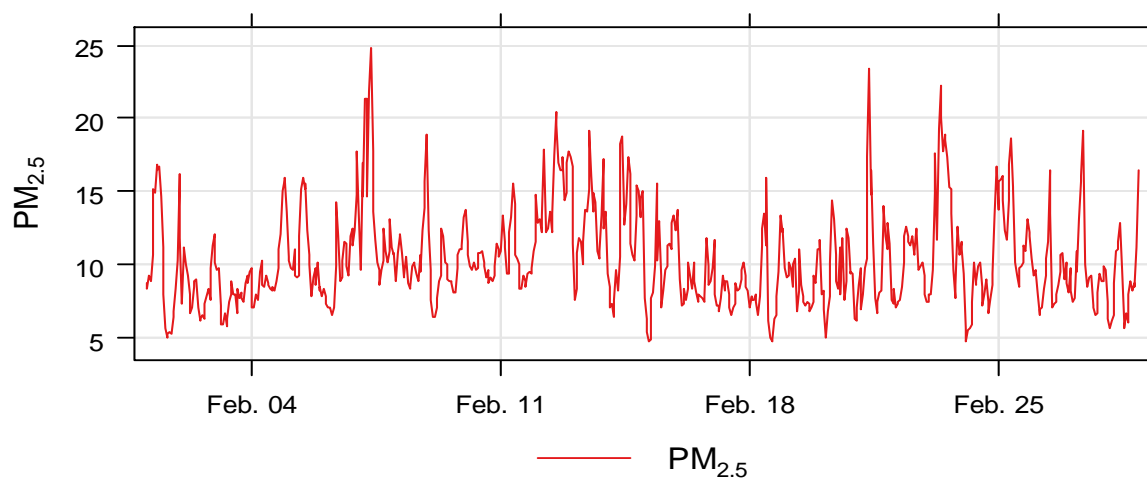


Figura 3: Variación de las concentraciones del PM_{2.5} en el aire (ug/m³) durante el mes de Febrero de 2019.

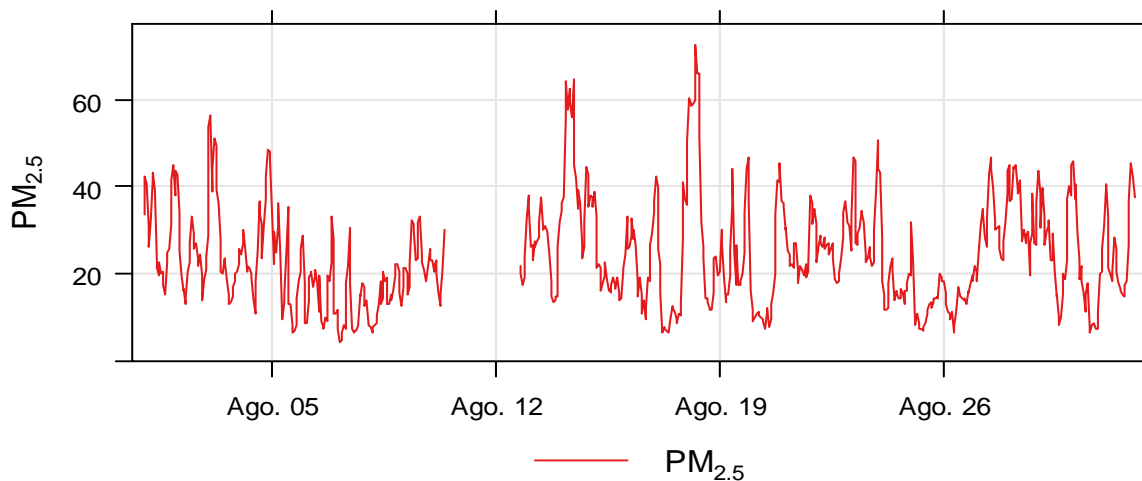


Figura 4: Variación de las concentraciones del PM_{2.5} en el aire (ug/m³) durante el mes Agosto de 2019.

Establecidos los dos escenarios de exposición febrero y agosto como se observa en las **figuras 3 y 4**, se puede apreciar que las concentraciones del material particulado 2.5 es tres veces mayor en el mes de agosto con referencia al mes febrero.

2.4. Escenarios de exposición

La exposición al (PM_{2.5}) que se encuentra en el aire no se da de manera continua durante las 24 horas del día en el organismo humano, debido a estas condiciones se establecieron horarios de “exposición” y “no exposición” como se presenta en la tabla 2, la cual indica que durante las 24 horas del día una persona adulta desarrolla diferentes actividades, de 1:00 am a 4:00 am del día se considera un escenario de descanso en el cual la persona no está expuesta al aire del exterior de su vivienda por lo tanto es un escenario de “no exposición”, durante la 5:00 am a 8:00 am del día se considera un escenario de “exposición” debido al desplazamiento de las personas a sus centros laborales, durante las 9:00 am a 3:00 pm del día las personas permanecen en sus centros de laborales evitando la exposición al aire del exterior considerándose un escenario de “no exposición”, durante las 4:00 pm a 9:00 pm del día las personas vuelven a desplazarse a sus domicilios volviendo a estar en contacto con el aire del exterior considerándose un escenario de “exposición”, durante las 10:00 pm a 12:00 am del día se vuelve a considerar un escenario de descanso al encontrarse las personas dentro de sus domicilios evitando la exposición por tanto se considera un escenario de “no exposición”.

Tabla 2

Duración en horas de los escenarios de exposición y no exposición al MP_{2.5}.

Horas del día	Duración	Escenario
1:00 PM - 4:00 AM	4 horas	No exposición
5:00 AM - 8:00 AM	4 horas	Exposición
9:00 AM - 3:00 PM	7 horas	No exposición
4:00 PM - 9:00 PM	6 horas	Exposición
10:00 PM - 12:00 AM	3 horas	No exposición

Como se observa en la **tabla 2** la exposición al particulado menor a 2.5 micrómetros presente en el aire solo representa una fracción de las horas totales del día, a partir de los escenarios establecidos como de “exposición” se seleccionaron solo los datos registrados por la estación Campo de Marte (CDM) durante las horas comprendidas

entre 05 a 08 (5:00 am a 8:00 am) y 16 a 21 (4:00 pm a 9:00 pm) horas del día, en los meses de febrero y agosto del 2019.

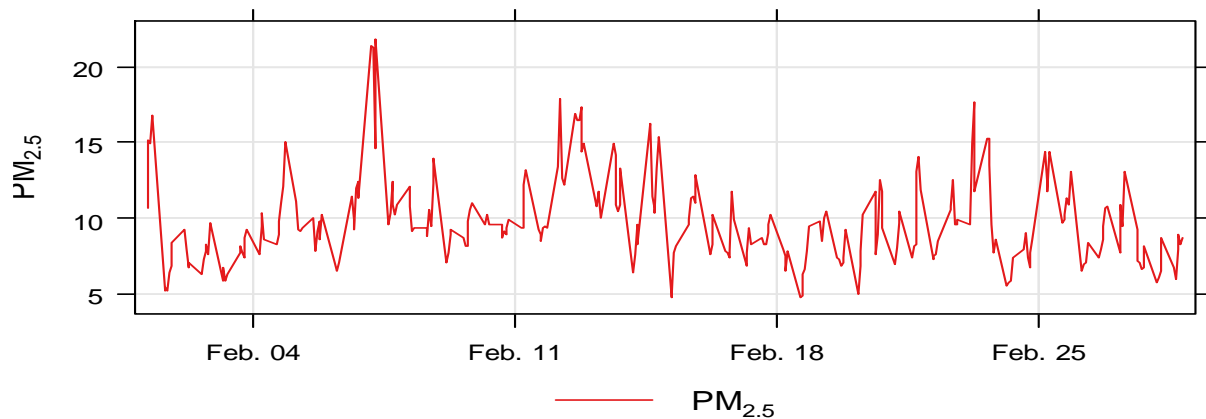


Figura 5: Variación de concentraciones del PM_{2.5} en el aire (ug/m³) durante las horas 5:00 am a 8:00 am y 4:00 pm a 9:00 pm en el mes de Febrero de 2019.

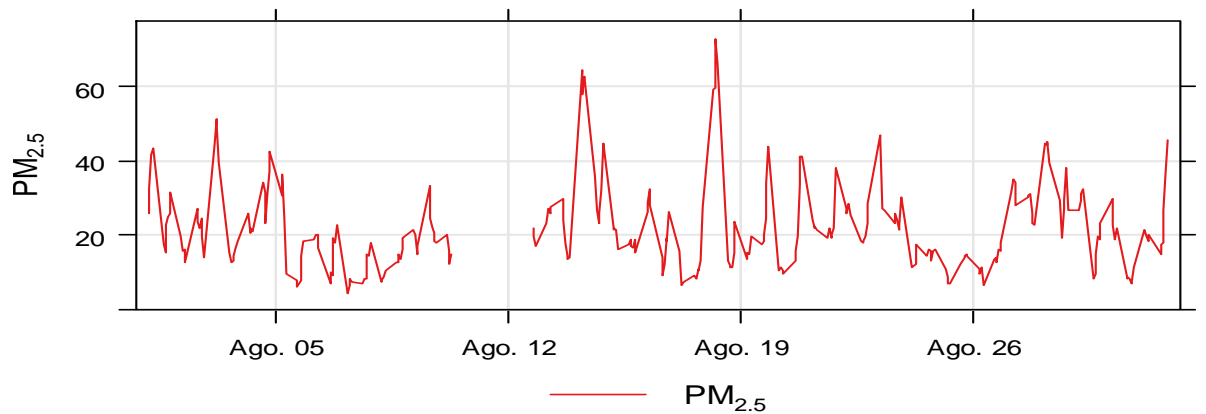


Figura 6: Variación de concentraciones del PM_{2.5} en el aire en ug/m³ durante las horas 5:00 am a 8:00 am y 4:00pm a 9:00 pm en el mes de Agosto de 2019.

Las **figuras 5 y 6** muestran la variación de las concentraciones en el aire del PM_{2.5} solo durante los escenarios de “exposición”, a lo largo de los meses de febrero y agosto del 2019, se aprecia una notable reducción de los datos registrados a diferencia de las **figuras 3 y 4**, sin embargo, las concentraciones mayores se mantienen en agosto en comparación con febrero.

2.5. Estimación de la dosis de exposición al PM_{2.5}

La exposición al PM_{2.5} que ingresa al organismo humano por medio del proceso de inhalación del aire se denomina dosis de exposición (US EPA, 2009), para lo cual se aplica la siguiente ecuación 1:

$$D_{exp} = \frac{C \times IR \times EF}{BW} \quad (1)$$

Donde:

D_{exp}: Dosis de exposición (mg/kg-día).

C: Concentración de PM_{2.5} (mg/m³).

IR: Tasa de inhalación (m³/día).

Mujer: 19.5 m³/día.

Hombre: 21 m³/día.

EF: Factor de exposición (Sin unidad).

BW: Peso corporal promedio (70kg).

En diferentes casos, el factor de exposición (EF) es equivalente a uno (01) en suplenencia de una diaria exposición al contaminante. Según la guía Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual. Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment (US EPA, 2009), la dosis de exposición por inhalación se estima a través de la exposición a material particulado, gases o vapores presentes en el aire a través de encontrar una Concentración modificada de Exposición (CE) como se presenta en la ecuación 2, que posteriormente se coteja de manera directa con la Concentración de Referencia.

$$C_{Mod} = \frac{C_A \times T_{Exp} \times F_{Exp} \times D_{Exp}}{P_{Exp}} \quad (2)$$

Donde:

C_{Mod} : Concentración modificada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

C_A : Concentración del contaminante ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

T_{Exp} : Tiempo de exposición (horas/día).

F_{Exp} : Frecuencia de exposición (días/mes).

D_{Exp} : Duración de exposición (meses).

$P_{Exp} = D_{Exp} \times \frac{\text{Dias}}{\text{Mes}} \times \frac{\text{Horas}}{\text{Dia}}$: Periodo de tiempo durante la exposición promediada (horas).

A partir de las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, se desarrolla la siguiente ecuación 3, la cual determina la masa del particulado menor a 2.5 micrómetros que ingresa y es asimilado por el organismo humano, para su determinación se utilizaron los datos de concentración horaria presentes en las figuras 5 y 6. En el Manual Exposure Factors Handbook de la (EPA, 2011) establece que un hombre adulto inhala en promedio $17.50 \text{ m}^3/\text{día}$ y una mujer adulta $15.02 \text{ m}^3/\text{día}$. Para efectos de este estudio se asumió una tasa de inhalación para una persona adulta de sexo masculino de $1.15 \text{ m}^3/\text{h}$ y para el sexo femenino de $1.05 \text{ m}^3/\text{h}$ de aire, para el factor de retención pulmonar se asume un valor de uno (01) debido a que todo el ($\text{PM}_{2.5}$) que ingresa al organismo es asimilado, para el tiempo de exposición horaria se asume el valor de uno (01), ya que los resultados de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ son registrados de forma horaria cada hora del día.

$$M_C = C_A \times T_I \times R_P \times T_{Exp} \quad (3)$$

Donde:

M_C : Masa de contaminante horaria asimilado por el organismo ($\mu\text{g}/\text{h}$).

C_A : Concentración horaria del contaminante ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

T_I : Tasa de inhalación horaria (m^3/hora).

R_P : Factor de retención pulmonar.

T_{Exp} : Tiempo de exposición horaria.

2.6. Análisis de la calidad del aire

El índice de calidad del aire fue aprobada a través de la R. M. N°181-2016-MINAM, donde se establece los parámetros para el material particulado (MINAM, 2016). En la **tabla 4** se puede visualizar los rangos del INCA.

Tabla 4

Índice de Calidad de Aire MP 2.5 Promedio de cada 24 horas.

INTERVALO DEL INCA	INTERVALO DE CONCENTRACIONES (ug/m ³)	CALIDAD DEL AIRE	CUIDADOS
0-50	0-12.5	BUENA	La calidad del aire es favorable y no simboliza un riesgo para la salud.
51-100	12.6-25	MODERADA	Los ciudadanos sensibles (niños, tercera edad, madres gestantes, personas con enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares) podrían presentar deficiencias en su salud.
101-500	25.1-125	MALA	Se podrían generar malestar en la salud de los habitantes sensibles. Los habitantes de lima centro podrían sentirse afectados.
> 500	> 125	UMBRAL DE CUIDADOMBRAL	La acumulación del contaminante puede originar consecuencias adversas en la salud de cualquier persona y severos efectos en los habitantes sensibles, tales como niños, ancianos, madres gestantes, personas con enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, y cardiovasculares.

Fuente: (MINAM, 2016).

Para comprender mejor el Índice de Calidad de Aire se fracciona en cuatro clases. La franja de coloración verde señala que la calidad del aire es buena, el color amarillo revela una calidad del aire es moderada; en la franja anaranjada se determina el valor umbral del estado de cuidado (VUEC) de cada uno de los contaminante, lo que nos demuestra que el aire tiene una calidad mala; por último, la franja roja de la cuarta banda nos manifiesta que la calidad del aire es mucho mayor al valor umbral del estado de protección del contaminante (MINAM, 2016), si el valor del INCA supera la concentración de 125 (ug/m³) corresponde la aplicación de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales por parte de las autoridades competentes.

2.7. Caracterización de los riesgos

Para encontrar el índice de riesgo primeramente se tiene que hallar el factor de exposición (EF), el cual en muchos de los estudios es uno (01), posteriormente se establecen los riesgos causados por el contaminante, que llega a la población adulta de lima centro por una vía o por varias, la identificación cuantitativa se produce si son sustancias con umbral o sin umbral (De La Cruz Grández, 2021). Para el análisis de los contaminantes con Umbral (No cancerígenos), se aplicará el Índice de Riesgo que vincula la concentración de exposición y la concentración similar para el trayecto de exposición y el tiempo de exposición correspondiente.

$$IR = \frac{C \text{ Diaria}}{C_{ref}}$$

Donde:

IR=Índice de Riesgo

IR > 1, se considera que existe un riesgo para la salud inaceptable y se deben tomar medidas.

IR < 1, el riesgo es aceptable

Cdiaria=Concentración diaria de exposición (ug/kg/día)

Cref=Concentración de referencia (ug/kg/día)

El NOAEL es la cantidad más alta de sustancias halladas de forma empírica o por observación que no provoque variaciones en la forma, capacidad funcional, crecimiento o periodo de la vida (De La Cruz Grández, 2021), se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$C_{ref} = \frac{NOAEL}{\text{Factor de Seguridad}}$$

Donde:

C_{ref}: Concentración referencial (mg/kg/día)

NOAEL= Índice de toxicidad (mg/kg/día)

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Después de haber finalizado el procesamiento de los resultados de las concentraciones del (PM_{2.5}), que consistió en ordenar de forma horaria durante 24 horas por día en los 12 meses del año 2019, se seleccionaron los meses de febrero y agosto, meses diferentes de las estaciones de verano e invierno en la ciudad de Lima, a partir de estos meses se establecieron escenarios durante las 24 horas de cada día, los cuales se denominaron escenario de “exposición” y “no exposición”. También se anotaron los parámetros meteorológicos de dirección de viento (0° a 360°) y la velocidad de viento (m/s) en el mes de febrero y agosto de 2019 según los escenarios establecidos, para medir la intensidad y la velocidad del viento se empleó la escala de Beaufort.

3.1. Análisis del comportamiento del viento

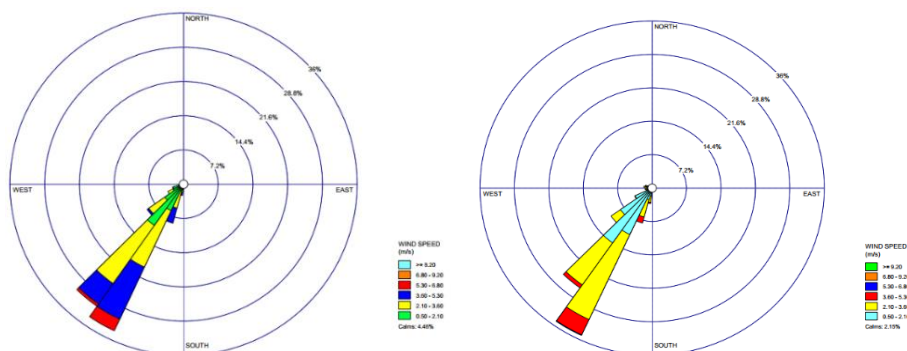


Figura 7 y 8: Distribución de los vientos en los meses de febrero (Izquierda) y agosto (Derecho) de 2019.

En las figuras 7 y 8 se puede apreciar la relación entre la velocidad y dirección del viento en la estación de monitoreo Campo de Marte en los meses de febrero y agosto de 2019. En ambas figuras se puede verificar que los vientos más fuertes provienen del Suroeste, los resultados obtenidos sobre la dirección del viento concuerdan con los registrados en el Informe de Vigilancia de la Calidad del Aire de Lima donde se determina que para ambos meses los vientos predominantes proceden del Suroeste Callao (SENAMHI, 2019). En el mes de agosto la concentración de PM_{2.5} fue tres veces mayor con respecto al mes de febrero (25 µg/m³), esto está influenciado por la velocidad del viento, ya que en el mes de agosto (invierno) se registraron velocidades de viento desde los 2.10 a 3.60 m/s, de acuerdo con la escala de Beaufort le corresponde una clasificación de vientos débiles y el mes de febrero (verano) tuvo vientos ligeros que van desde los 5.30 n/s a 6.80 m/s. Además, en la dispersión del PM_{2.5} también influyen las inversiones térmicas específicas las cuales se dan en invierno, estos resultados obtenidos son semejantes a los producidos por (Reátegui Romero, 2018) donde señala que en el mes de febrero la dispersión del PM_{2.5} es mayor con referencia al mes de julio (estación invierno) a causa de la velocidad del viento y la inversión térmica.

3.2. Análisis de concentraciones en el aire del PM_{2.5}

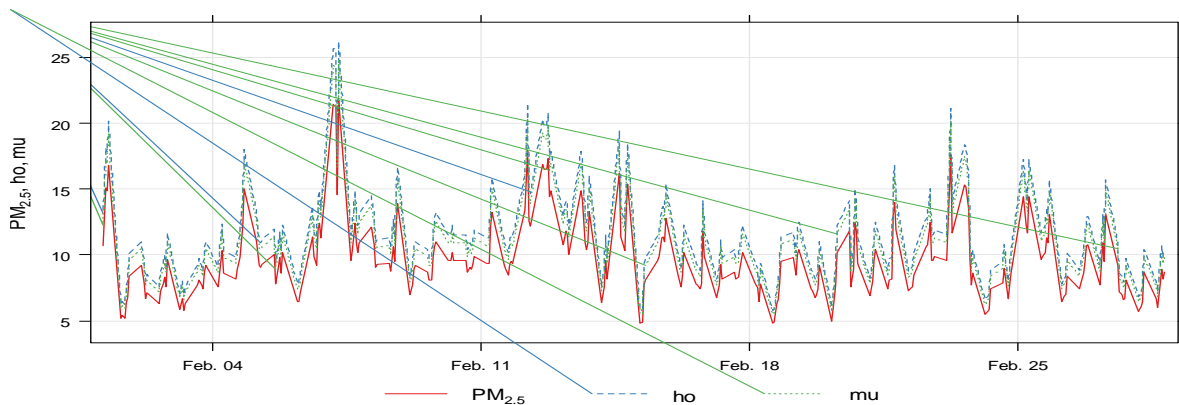


Figura 9: Variación de concentraciones del PM_{2.5} en el aire en ug/m³ durante las horas 5:00 am a 8:00 am y 4:00 pm a 9:00 pm durante febrero del 2019.

En la **fig. 9** se aprecia la variación temporal en ug/m³ de la cantidad de PM_{2.5} en el aire en el mes de febrero a través de la línea continua de color rojo, para analizar adecuadamente las concentraciones horarias a la que esta “expuesta” la población adulta se asignó la variable “ho” que representa a un adulto de sexo masculino y “mu” a un adulto de sexo femenino, la concentración a la que se encuentra expuesta “ho” supera ligeramente a la que está expuesta “mu”, debido a que la capacidad de inhalación pulmonar de un cuerpo masculino es mayor al femenino. Tanto “ho” y “mu” registran mayores valores en comparación con la concentración de PM_{2.5} en el ambiente, esto se da debido a que el volumen de aire que incorporar al organismo es mayor a 1 m³/h en adultos de ambos sexos. Durante las horas de “exposición” de los 28 días del mes de febrero se contempla que las concentraciones ambientales superan los 5 µg/m³ de PM_{2.5} establecido en la directriz de la (OMS, 2021), pero se encuentran por debajo de los 25 µg/m³ de PM_{2.5} dispuesto en el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (MINAM, 2017).

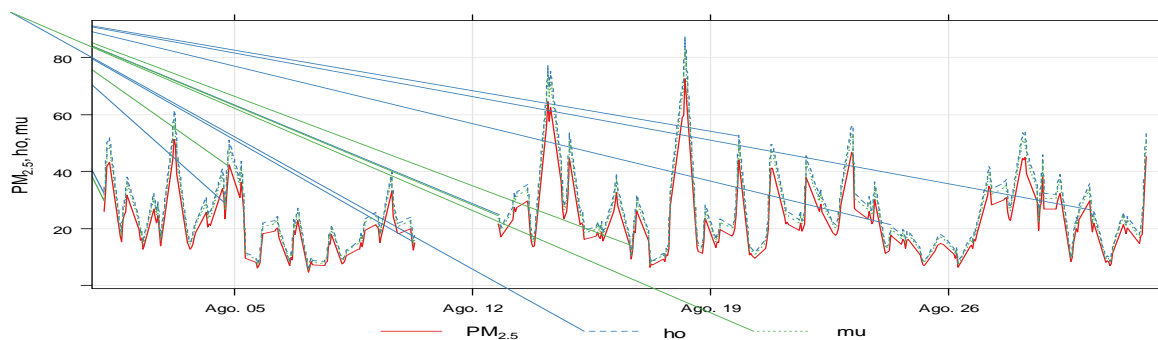


Figura 10: Variación de las concentraciones del PM_{2.5} en el aire en ug/m³ durante las horas 5:00 am a 8:00 am y 4:00 pm a 9:00 pm durante agosto del 2019.

En la **fig. 10** se aprecia la variación temporal en ug/m³ de la concentración de PM_{2.5} en el aire para el mes de agosto solo para las horas en las cuales está “expuesta” la población adulta, mediante las variables “ho” y “mu” observamos que las concentraciones que ingresan al organismo siguen siendo mayores a las del ambiente, esto se debe a como se describió en la **figura 9**, el volumen del aire que ingresa al organismo es mayor a 1 m³/h en adultos de ambos sexos. A diferencia del mes de febrero observamos un considerable aumento en las concentraciones del PM_{2.5} en el ambiente, como en las concentraciones que ingresan al organismo, superando los 5 µg/m³ de PM_{2.5} establecido en la directriz de la (OMS, 2021) y muy por encima de los 25 µg/m³ de PM_{2.5} establecido en el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (MINAM, 2017).

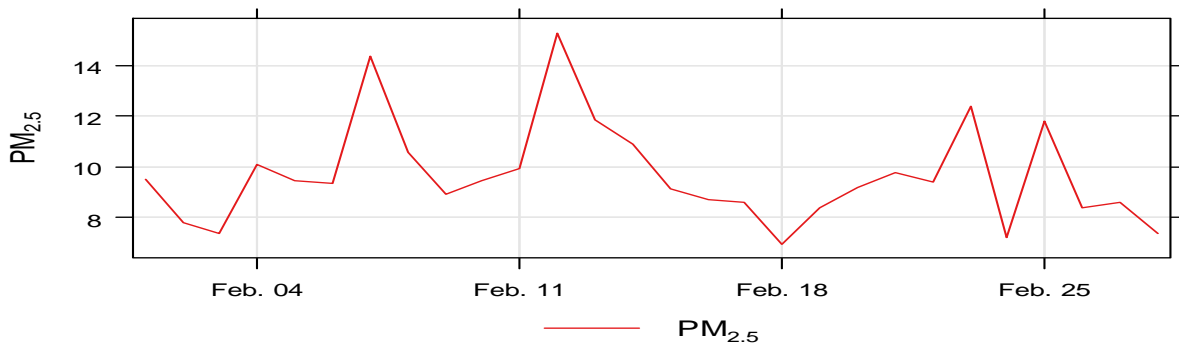


Figura 11: Promedio diario de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en horas de exposición 5:00 am a 8:00 am y 4:00 pm a 9:00 pm durante Febrero de 2019.

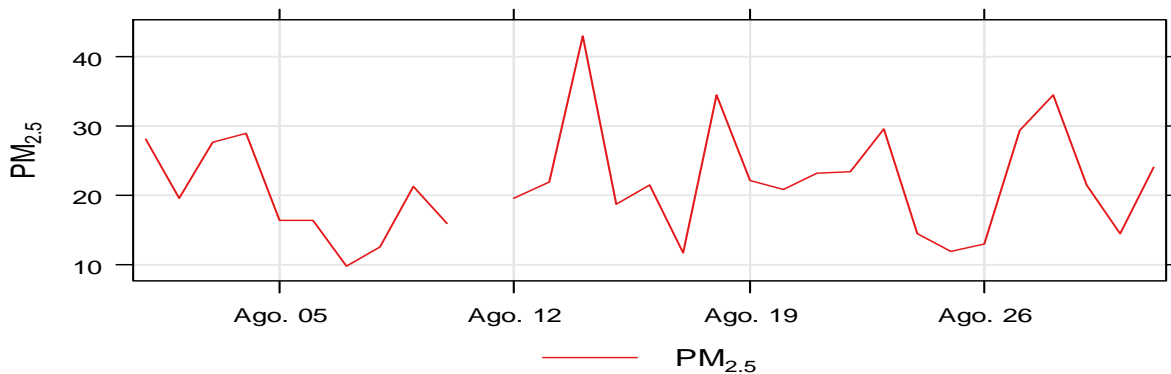


Figura 12: Promedio de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ en horas de exposición 5:00 am a 8:00 am y 4:00 pm a 9:00 pm durante Agosto de 2019.

El análisis de los promedios diarios de las concentraciones del $PM_{2.5}$ en el aire registradas en horas de “exposición” y “no exposición” así como durante las 24 horas continuas del día. Se observa en la **figura 11** los promedios diarios en las horas de exposición para el mes de febrero, obteniéndose un promedio de 9.66 ug/m^3 de $PM_{2.5}$ en el aire, de igual manera para el mismo mes se obtuvo que en promedio al organismo humano ingresa 11.6 ug/h en hombres y 11.0 ug/h en mujeres de $PM_{2.5}$. En la **figura 12** de igual forma a través de promedios diarios, se aprecia que las concentraciones en horas de exposición para agosto son superiores a febrero obteniéndose un promedio de 21.8 ug/m^3 de $PM_{2.5}$ en el aire, e ingresando al organismo humano un promedio de 26.1 ug/h en hombres y 24.8 ug/h en mujeres.

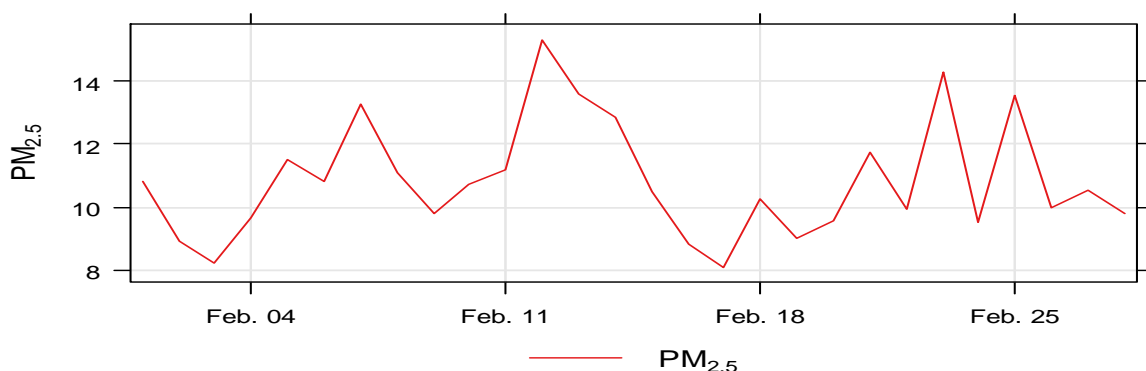


Figura 13: Promedio diario de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en horas de no exposición 1:00 am a 4:00 am, 9:00 am a 3:00 pm y 10:00 pm a 12:00 am durante Febrero de 2019.

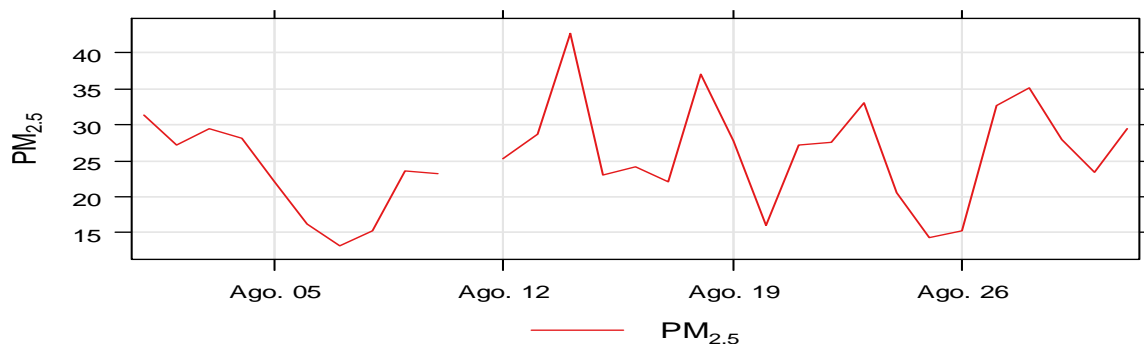


Figura 14: Promedio diario de las concentraciones de PM_{2.5} en horas de no exposición 1:00 am a 4:00 am, 9:00 am a 3:00 pm y 10:00 pm a 12:00 am durante Agosto de 2019.

Para horas de no exposición como se muestra en las **figuras 13 y 14** de igual manera se determinó las concentraciones promedio en el aire y las que ingresarían al organismo humano de estar una persona expuesta tanto para febrero como para agosto, obteniéndose para febrero un promedio de 10.8 ug/m³ de PM_{2.5} en el aire, 13.0 ug/h para hombres y 12.4 ug/h para mujeres de PM_{2.5} que ingresa al organismo, en agosto se obtuvo 25.5 ug/m³ de PM_{2.5} en el aire, 30.6 ug/h para hombres y 29.0 ug/h para mujeres de PM_{2.5} que ingresa al organismo.

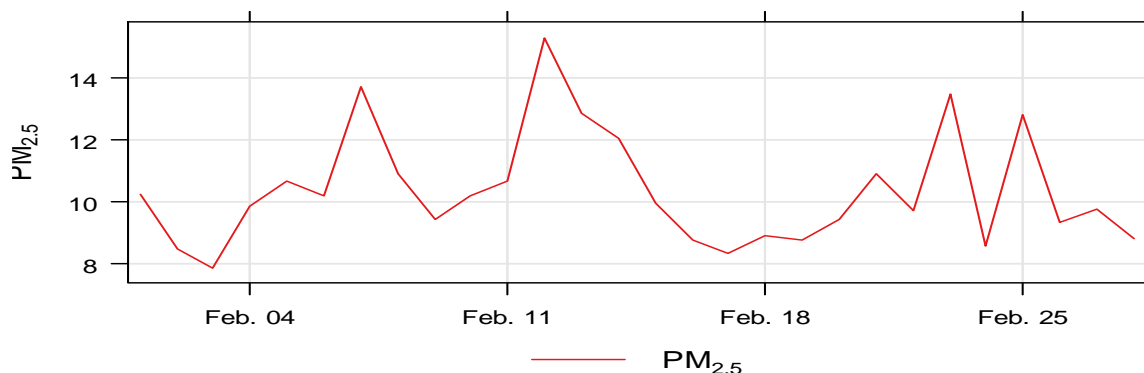


Figura 15: Concentraciones promedio diario durante 24 horas continuas de PM_{2.5} en el aire a lo largo de los 28 días del mes de Febrero de 2019.

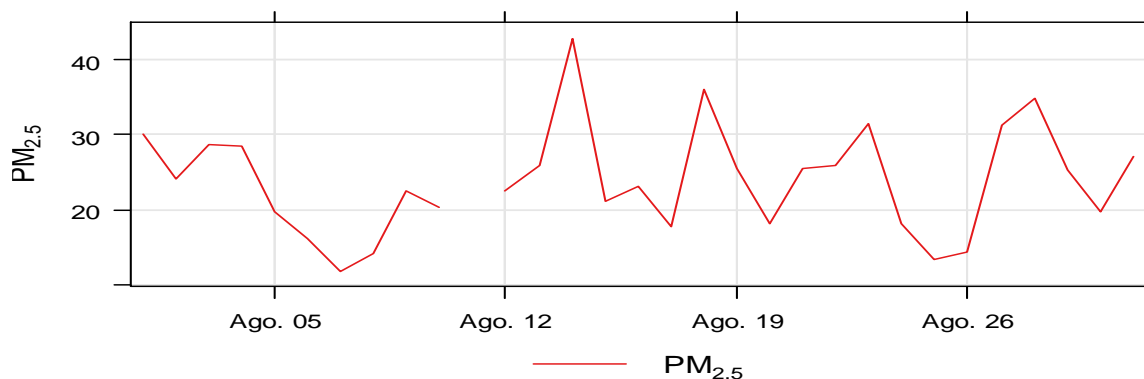


Figura 16: Concentraciones promedio diario durante 24 horas continuas de PM_{2.5} en el aire a lo largo de los 31 días del mes de Agosto de 2019.

Para las concentraciones promedio durante 24 horas se obtuvieron valores intermedios entre los escenarios de exposición y no exposición, con 10.3 ug/m³ de PM_{2.5} en el aire para febrero y 23.9 ug/m³ para agosto, aunque estos resultados muestren las concentraciones promedio en el aire de PM_{2.5} para ambos meses solo tienen un uso como valores referencia ya que en la práctica el porcentaje de la población la cual tendría una exposición continua de 24 horas es despreciable o muy pequeña.

3.3. Análisis de la concentración del PM_{2.5} que ingresa al organismo

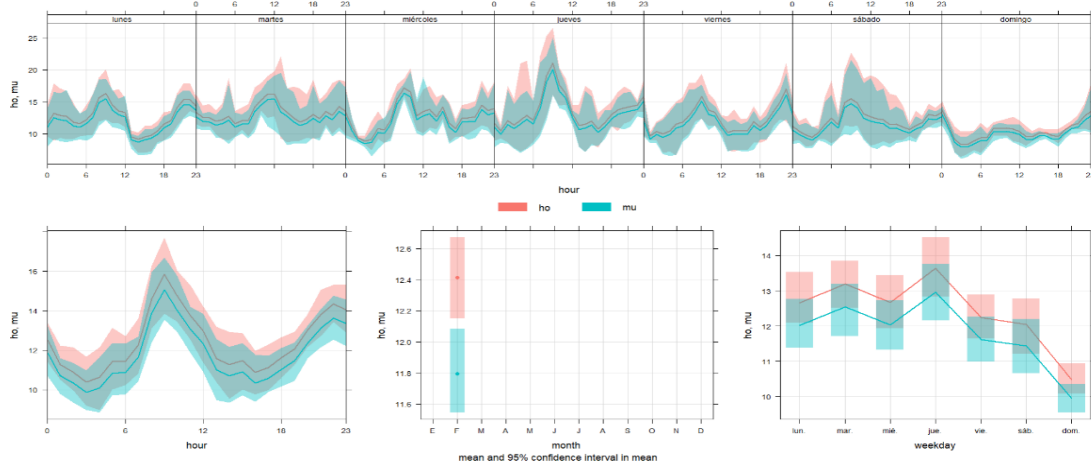


Figura 17: Variación horaria de las dosis del PM_{2.5} que ingresan al organismo humano en hombres (“ho”) y mujeres (“mu”) durante el mes de febrero de 2019.

A partir de las concentraciones en el aire de PM_{2.5} se calcularon las dosis horarias en microgramos por hora (ug/h) que ingresan al organismo humano adulto, “ho” representa a un adulto de sexo masculino y “mu” a un adulto del sexo femenino como se observa en la **figura 17** para el mes de febrero del 2019, la variación de las dosis promedio en función de las 24 horas continuas del día al 95% de intervalo de confianza muestran valores ligeramente mayores en adultos hombres en comparación de los adultos mujeres, esto es debido al factor del volumen de aire que ingresa a los pulmones que es mayor en hombres a diferencia de las mujeres.

En la grafico superior de la **figura 17** se observa la variación de las dosis en los días de la semana, en el cual el día jueves es el que presenta un mayor nivel de dosis posible de PM_{2.5} que podría ingresar al organismo si una persona adulta está expuesta entre las 7:00 am a 1:00 pm del día, a diferencia de los domingos que las concentraciones se mantienen en niveles bajos durante todo el día. En la misma figura en el grafico izquierdo inferior observamos las variaciones de las concentraciones para un día promedio del mes febrero, donde los mayores niveles se dan entre las 8:00 am y 1:00 pm con valores entre 14 a 17.5 ug/h que corresponden a escenarios de no exposición para este estudio, lo cual indica que las personas no están expuestas durante los mayores niveles potenciales de dosis que podrían ingresar al organismo.

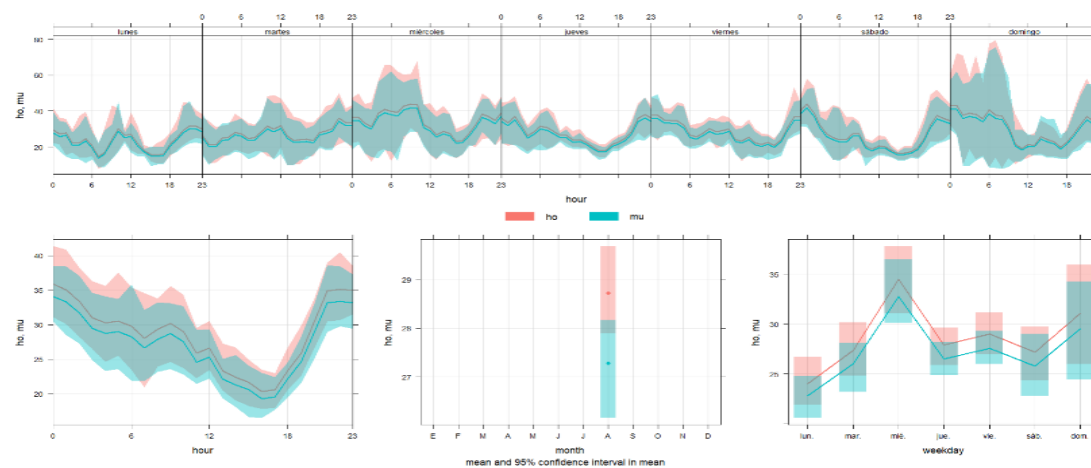


Figura 18: Variación horaria de las dosis del PM_{2.5} que ingresan al organismo humano en hombres (“ho”) y mujeres (“mu”) a lo largo del mes de agosto de 2019.

La **figura 18** muestra resultados similar a la **figura 17** de las dosis potenciales de $PM_{2.5}$ en $\mu g/h$ presentes en el aire para hombres y mujeres en edad adulta durante el mes de agosto 2019, en el grafico superior se observa que los días miércoles y domingos presentan los mayores valores de dosis durante las 00:00 horas y 12:00 del mediodía, en el grafico izquierdo inferior observamos los resultados de las variaciones de las dosis para un día promedio del mes agosto donde presentan valores muy por encima a comparación de febrero con 30 a 40 $\mu g/h$ entre las horas 00:00 a 12:00 del mediodía para volver a incrementarse a partir de las 9:00 pm hacia la media noche.

Como se observa en las **figuras 17 y 18** ambas presentan las dosis potenciales de $PM_{2.5}$ en $\mu g/h$ que podrían ingresar al organismo de estar una persona adulta expuesta, sin embargo, al establecer los escenarios de exposición y no exposición al $PM_{2.5}$ se asume que solo se está expuesto o no en las horas comprendidas en cada escenario, obteniéndose para un escenario de exposición y no exposición durante el mes de febrero las **figuras 19 y 20**, las cuales presentan los μg de $PM_{2.5}$ acumulados durante las horas de cada día que ingresan o no al organismo, se asume que todo el $PM_{2.5}$ que ingresa al organismo se asimila en su totalidad debido a su tamaño.

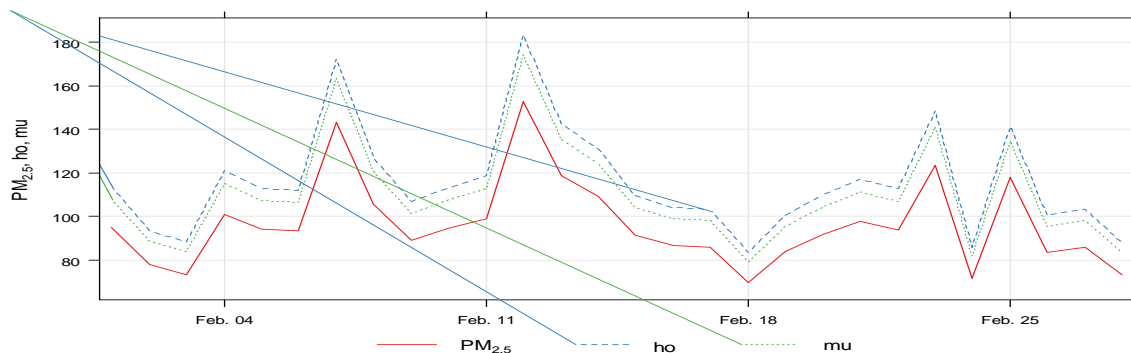


Figura 19: Concentración acumulada diaria de $PM_{2.5}$ en μg que ingresa al organismo humano en horas de **exposición** durante febrero del 2019.

Observamos en la **figura 19** que los valores de $PM_{2.5}$ acumulados por día en hombres son ligeramente mayores que en mujeres con valores que van entre los 90 a 180 $\mu g/día$, en cuanto a los valores acumulados de $PM_{2.5}$ en horas en las cuales una persona no está expuesta van entre los 125 a 250 $\mu g/día$, tal como se evidencia en la **figura 20**, lo cual nos revela que las horas en las cuales no existe una exposición durante el mes de febrero presenta un riesgo mayor, ya que existen concentraciones mayores de $PM_{2.5}$ a comparación de horas de exposición.

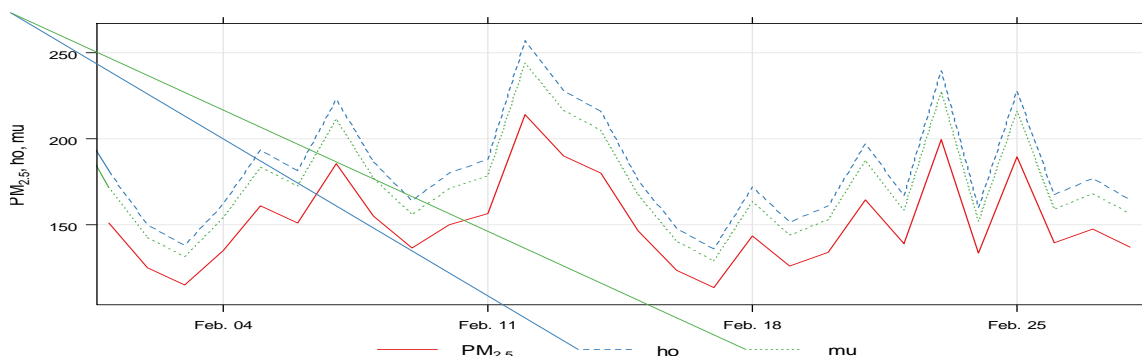


Figura 20: Concentración acumulada diaria de $PM_{2.5}$ que ingresa al organismo humano en horas de **no exposición** durante febrero de 2019.

En las **figuras 21 y 22** se presentan las concentraciones del $PM_{2.5}$ acumulada durante las horas de exposición cada día durante el mes de agosto que ingresan o no al organismo a través de los escenarios de exposición y no

exposición, se asume que todo el $PM_{2.5}$ que ingresa al organismo se asimila en su totalidad debido a su tamaño. Observamos en la **fig. 21** que los valores del $PM_{2.5}$ acumulados por día en hombres son ligeramente mayores que en mujeres con valores que van entre los 100 a 500 $\mu g/día$ para las horas de exposición, en cuanto a los valores acumulados de $PM_{2.5}$ en horas en las cuales una persona no está expuesta van entre los 100 a 750 $\mu g/día$ como se observa en la **figura 22**, lo cual indica de manera similar al mes de febrero que las horas en las cuales no existe una exposición durante el mes de agosto se presenta un mayor riesgo a asimilar en el organismo mayor cantidad de $PM_{2.5}$ a comparación de horas de exposición.

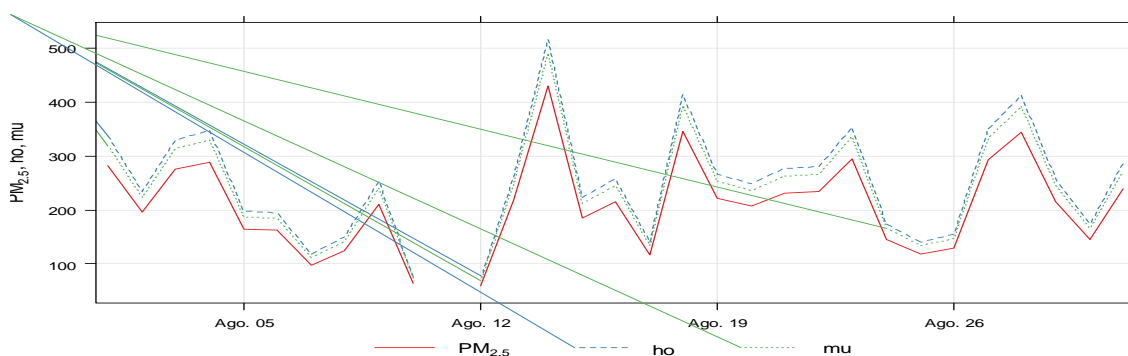


Figura 21: Concentración de acumulación diaria de $PM_{2.5}$ en μg que ingresa al organismo humano en horas de exposición durante agosto de 2019.

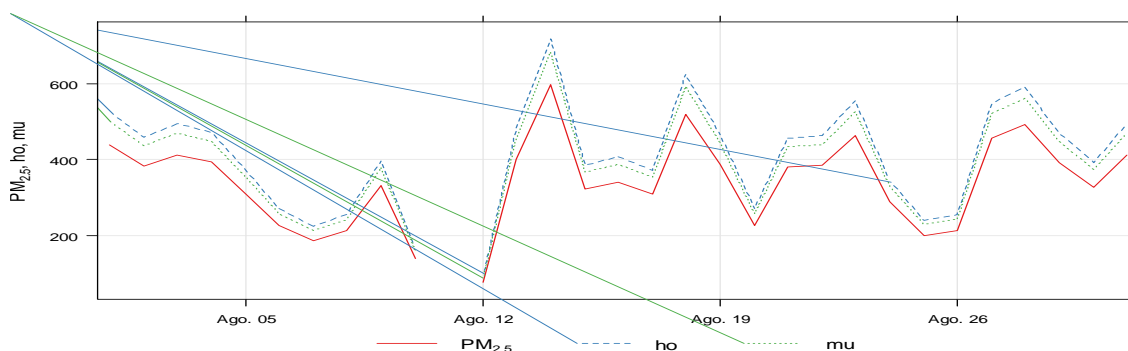


Figura 22: Concentración de acumulación diaria de $PM_{2.5}$ en el aire que ingresa al organismo humano en horas de no exposición durante agosto del 2019.

Como se observa en las **figuras 19 y 21** se aprecian las concentraciones acumuladas diarias de $PM_{2.5}$ en horas de exposición en los meses de febrero y agosto y en las **figuras 20 y 22** para horas no exposición para los mismos meses respectivamente, ambos escenarios presentan valores diarios en rangos variables, para lo cual se observa en la tabla 3 el total de Material Particulado ($PM_{2.5}$) que ingreso al organismo en el caso de los escenarios de exposición y Material Particulado ($PM_{2.5}$) potencial que podría ingresar al organismo de estar una persona expuesta en el caso de los escenarios de no exposición. Se observa que las cantidades acumuladas en mujeres es un 7.8% menor en comparación a los hombres. Para el mes de febrero la cuantía del $PM_{2.5}$ acumulado en microgramos en horas de no exposición es un 52.3% más que en horas de exposición, para el mes de agosto se visualiza la misma tendencia con un 53.2% más en horas de no exposición en comparación con las de exposición, comparando ambos meses en horas de exposición se presencia un 139% más de $PM_{2.5}$ acumulado en μg en el mes de agosto con relación a febrero, y en horas de no exposición un 140.5% en agosto a de febrero. Estos resultados nos llevan a sostener que los rangos de contaminación por exposición al Material Particulado ($PM_{2.5}$) son en promedio un 140% más perjudiciales para la salud humana en el mes de agosto en contraste con el mes de febrero, lo que pone en riesgo a casi medio millón de personas (471 390 habitantes) distribuidas en 5 distritos de Lima centro.

Tabla 3

Material Particulado (PM_{2.5}) Total Mensual Acumulado en el Organismo.

Mes	Escenario	PM _{2.5} Acumulado en Hombres (ug)	PM _{2.5} Acumulado en Mujeres (ug)
Febrero	Exposición	3345.88	3083.58
	No exposición	5096.64	4841.80
Agosto	Exposición	7999.10	7124.14
	No exposición	12258.31	11645.40

Los resultados presentados solo muestran los análisis de los meses de febrero y agosto del 2019 para los escenarios establecidos en la presente investigación como se observa en la **tabla 3**, de forma aparente estos valores acumulados de Material Particulado (PM_{2.5}) pueden representar cantidades despreciables, sin embargo, los meses solo representan un pequeño periodo de análisis en el tiempo, ya que una persona adulta está expuesta durante muchos años a lo largo de su vida a los diversos agentes contaminantes presentes en el aire en las áreas urbanas, por lo que si llevamos estas cantidades a un análisis con un mayor periodo de tiempo obtendremos cantidades acumuladas altamente peligrosas para la salud humana.

3.4. Analisis de la calidad de aire

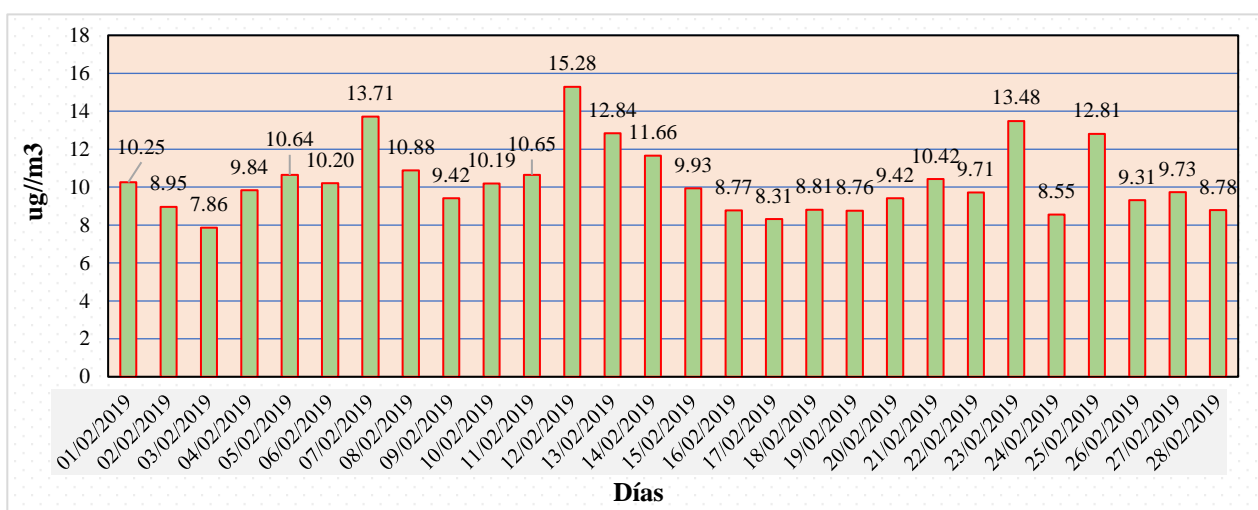


Figura 23: Concentración diaria del PM_{2.5} en el mes de febrero de 2019.

Tal como se puede apreciar en la **figura 23** la concentración diaria del Material Particulado fino (PM_{2.5}) no superó el límite de ECA PM_{2.5}: 50,0 ug/m³ en los veintiocho días monitoreados. La concentración diaria más próxima al límite autorizado se reflejó el día doce de febrero (15,28 ug/m³). Las concentraciones del Material Particulado fino (PM_{2.5}), durante las siguientes fechas 07, 12, 13, 23 y 25 se encontraron en el intervalo 51-100 por lo que de acuerdo con la tabla 4 en el mes de febrero se contaría con una calidad de aire moderada, pero dañina para la salud del ciudadano sensible, los cuales podrían percibir alguno tipo de problema en la salud.

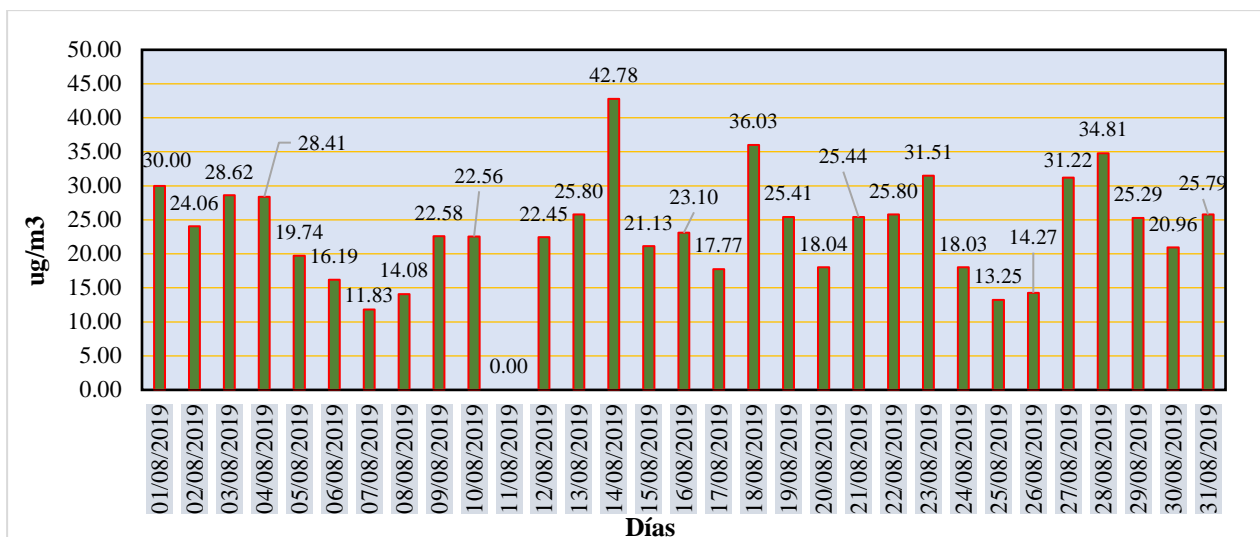


Figura 24: Concentración diaria del PM_{2.5} en el mes de agosto de 2019.

Se puede apreciar la concentración diaria del material particulado fino (PM_{2.5}) para el mes de agosto, la cual no superó el límite establecido en el ECA (PM_{2.5}): 50,0 ug/m³ en los 31 días monitoreados. La concentración diaria más próxima al límite permitido se reflejó el día 14 (47,78 ug/m³). 13 días de los 31 días del mes de agosto se encuentran dentro del intervalo 51-100 por lo que, de acuerdo con la tabla 4 el mes de agosto se contaría con una calidad de aire mala, por lo tanto, se debe dejar de hacer ejercicio y/o actividad al aire libre, ya que la población sensible puede experimentar problemas en la salud.

3.5. Análisis del índice de riesgo

Se establece la probabilidad de que se genere una situación desfavorable en la salud de la población de lima centro. Por lo que, se empleó el Índice de Riesgos, el cual es el cotejo de la concentración diaria de exposición y la concentración de referencia, para el trayecto y el periodo de exposición. Cuando el valor del ÍR es uno (1) o menor a uno (<1) representa seguridad ya que, esta concentración a nivel ambiental es halla por debajo o en el límite establecido como seguro (De La Cruz Grández, 2021). Si este cociente sobrepasa la unidad, afirma que la exposición ambiental para la población en estudio está acrecentándose y puede procrear efectos desfavorables en la salud humana.

Tabla 4

Valores del Índice de Riesgos

IR	SITUACION	RIESGO
IR <1	Concentración menor al límite establecido como seguro	NO
IR = 1	Concentración se encuentra en límite determinado como seguro	NO
IR >1	Concentración mayor al límite fijado como seguro	SI

Fuente: (De La Cruz Grández, 2021).

Se determinó el ÍR para la población de lima centro para el mes de verano (febrero) e invierno (agosto), cabe recordar que el factor Cref y NOELHEC se obtuvieron de la ATSDR, Agency for toxic Substance & Disease Registry (Rodríguez et al., 2016), para desarrollar la presente investigación empleamos los resultados de diésel (emisiones de motores diésel) habiéndose establecido 5 ug/m³ la concentración referencial.

Tabla 5

Valores del Índice de Riesgos (PM_{2.5}) durante el mes de febrero.

Sexo	Concentración de Exposición (mg/m ³ . día)	Cref (ug/m ³)	IR
Hombre	0.0026	5	0.52
mujer	0.0022	5	0.44

La tabla 5, nos muestra el índice de riesgo (mg/kg/día) en la salud de la población de lima centro en el mes de febrero de 2019, donde los valores encontrados en los hombres son superiores a las mujeres, esto se debería a la mayor capacidad de inhalación por parte de un hombre, los resultados del estudio exponen las concentraciones menores al rango establecido como seguro (IR<1).

Tabla 6

Valores del Índice de Riesgos (PM_{2.5}) durante el mes de agosto.

Sexo	Concentración de Exposición (MG/m ³ . día)	Cref (ug/m ³)	IR
Hombre	0.0060	5	1.19
mujer	0.0051	5	1.02

En la tabla 6, se puede apreciar los datos obtenidos sobre el índice de riesgos en salud para hombres y mujeres que se encuentran expuestos al PM_{2.5} en el mes de agosto de 2019, donde todos los datos obtenidos muestran concentraciones por encima del rango fijado como seguro (IR >1).

4. CONCLUSIONES

A partir de los datos del Material Particulado (PM_{2.5}) de la estación Campo de Marte (CDM) durante el 2019, única estación de la Red de Calidad de Aire de Lima con un porcentaje mayor al 75% de datos registrados para los meses de febrero y agosto, se analizó la dirección y velocidad de viento y se establecieron escenarios de exposición y no exposición para este agente contaminante en el aire, obteniéndose las siguientes conclusiones.

La dirección del viento de la estación de monitoreo Campo de Marte para los meses de febrero y agosto de 2019 tuvo una influencia marcada de Suroeste a Noreste. en el mes de agosto la concentración de PM_{2.5} fue tres veces mayor con respecto al mes de febrero (25 µg/m³), esto esta influenciado por la celeridad del viento, ya que el mes de agosto tuvo velocidades de viento desde los 2.10 a 3.60 m/s de acuerdo con la escala de Beaufort le corresponde una clasificación de vientos débiles y el mes de febrero tuvo vientos ligeros que van desde los 5.30 m/s a 6.80 m/s. Además, en la dispersión del PM_{2.5} también influyen las inversiones térmicas específicas las cuales se dan en invierno.

Para el mes de febrero del 2019 durante las horas de exposición las concentraciones de PM_{2.5} superaron los 5 µg/m³ establecido en la directriz de la OMS sobre la calidad del aire (OMS, 2021), pero se encuentran por debajo 25 µg/m³ de PM_{2.5} establecidos en el ECA para Aire (MINAM, 2017). El promedio de concentraciones de PM_{2.5} en el aire en horas de exposición es 9.66 ug/m³ y el promedio de PM_{2.5} que ingresa al organismo humano durante estas horas fue de 11.6 ug/h en hombres y 11.0 ug/h en mujeres de PM_{2.5}. En horas de no exposición las concentraciones promedio de PM_{2.5} en el aire fueron de 10.8 ug/m³ y el promedio de PM_{2.5} que ingresa al organismo humano durante estas horas fue de 13.0 ug/h en hombres y 12.4 ug/h en mujeres. Durante este mes los

días jueves presentaron los mayores niveles de dosis potenciales que podrían ingresar al organismo de estar una persona expuesta entre las 7:00 am a 1:00 pm del día y los días domingos presentaron los niveles más bajos de dosis posibles durante todo el día, para un día promedio de este mes los mayores niveles de dosis se dan entre las 8:00 am y 1:00 pm con valores entre 14 a 17.5 ug/h que corresponden a horas de no exposición. Los valores de PM_{2.5} acumulados por día en hombres en horas de exposición son ligeramente mayores que en las mujeres con valores entre los 90 a 180 ug/día, los valores acumulados en horas de no exposición van entre los 125 a 250 ug/día.

Para el mes de agosto del 2019 durante las horas de exposición, las concentraciones del PM_{2.5} superan los 5 µg/m³ establecido en la directriz de la OMS sobre la calidad del aire (OMS, 2021), y se encuentran por encima de 25 µg/m³ de PM_{2.5} del ECA para Aire (MINAM, 2017). El promedio de las concentraciones del PM_{2.5} en el aire en horas de exposición es 21.8 ug/m³ y el promedio de PM_{2.5} que ingresa al organismo humano durante estas horas fue de 26.1 ug/h en hombres y 24.8 ug/h en mujeres. En horas de no exposición las concentraciones promedio de PM_{2.5} en el aire fueron de 25.5 ug/m³ y el promedio de PM_{2.5} que ingresa al organismo humano durante estas horas fue de 30.6 ug/h en hombres y 29.0 ug/h en mujeres. Durante este mes los días miércoles y domingos presentaron los mayores niveles de dosis potenciales que podrían ingresar al organismo de estar una persona expuesta entre las 00:00 horas de la media noche hacia 12:00 del mediodía, para un día promedio de este mes los mayores niveles de dosis se dan 00:00 horas de la media noche hacia 12:00 del mediodía incrementándose nuevamente a partir de las 9:00pm con valores entre 30 a 40 ug/h. Los valores de PM_{2.5} acumulados por día en hombres en horas de exposición son ligeramente mayores que en mujeres con valores entre los 100 a 500 ug/día, los valores acumulados en horas de no exposición van entre los 100 a 750 ug/día.

Para ambos meses las cantidades acumuladas PM_{2.5} en mujeres es un 7.8% menor en comparación a los hombres, para el mes de febrero y agosto estas masas acumuladas potenciales presentan mayores valores en horas de no exposición siendo así estas horas un 52.3% y 53.2% respectivamente más perjudiciales para la salud de estar una persona expuesta al aire libre. Comparando ambos meses en horas de exposición se presencia un 139% más de PM_{2.5} acumulado en el organismo humano en el mes de agosto con relación a febrero, en horas de no exposición un 140.5% más en agosto a comparación de febrero, concluyendo que la contaminación por exposición al PM_{2.5} es un 140% más nocivo para la salud de la población en el mes de agosto en comparación con febrero poniendo en riesgo a casi medio millón de personas (471 390 habitantes) distribuidas en 5 distritos colindantes a la estación en estudio en pleno núcleo urbano de la ciudad de Lima.

El índice de calidad del aire en el mes de febrero fue moderado pero dañina para la población sensible, la concentración diaria más contiguo al límite autorizado se registró el día 12 de febrero (15,28 ug/m³). La calidad del aire para el mes agosto fue de mala, se tiene que obviar cualquier tipo de deporte al aire libre, y la concentración diaria más próximo al rango admitido se registró el día 14 de agosto (47,78 ug/m³). El índice de riesgo para la salud en el mes de febrero es inferior al límite seguro y el índice de riesgo para el mes de agosto se encuentra por encima del límite seguro.

5. RECOMENDACIONES

Los datos de las estaciones meteorológicas de la red de calidad de aire de Lima Metropolitana del 2019 y 2020 evidenciaron un registro incompleto horarios de múltiples parámetros meteorológicos y de calidad de aire, por lo

cual se recomienda al (SENAMHI) mejorar las gestiones administrativas para que estos datos registren el comportamiento continuo de las condiciones del aire.

Debido a que solo la estación Campo de Marte (CDM) presento datos adecuados y con registro representativos, se trabajó con esta estación sin embargo la cantidad de datos es abundante y solo se investigaron los meses de febrero y agosto, se recomienda desarrollar investigaciones más detalladas para todos los meses del año, como analizar e identificar las posibles fuentes del Material Particulado menor a 2.5 micrómetros (PM 2.5).

En cuanto a las dosis de PM 2.5 que ingresan al organismo humano se recomienda desarrollar investigaciones con datos de mayor cantidad de años para cuantificar el efecto del PM 2.5 en el organismo, así como en diferentes rangos de edades y grupos poblacionales.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú por el suministro y autorización para el empleo de datos de su red de monitoreo de calidad de aire de Lima Metropolitana, así como al Ingeniero Ambiental Dario Ccaccya Ccaccya docente de la UPeU, Lima-Perú por su orientación en el desarrollo de esta investigación.

7. REFERENCIAS

- OMS. (2018). Calidad de aire y salud. Recuperado de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Khaniabad, Y. O., Sicard, P., Taiwo, A. M., De Marco, A., Esmaeili, S., & Rashidi, R. (2018). Modelado de la dispersión de material particulado de una planta de cemento: estudio de caso con viento en contra del viento, 4–11. <http://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.022>
- Romero, M., Olite, F., & Álvarez, M. (2006). Unsuspected finding on a gastric emptying study. *Clinical Nuclear Medicine*, 16(10), 780–781. <https://doi.org/10.1097/00003072-199110000-00018>
- OMS. (2014). La calidad del aire se está deteriorando en muchas de las ciudades del mundo. Disponible en http://www.paho.org/hq/index.php?id=9558%3AAir-quality-is-deteriorating-in-many-of-the-worlds-cities&option=com_content. Consultado 4 feb. 2015.
- OMS. (2005). Contaminación del aire por material particulado: como daña la salud. Retrieved from http://www.paho.org/hq/index.php?id=9558%3AAir-quality-is-deteriorating-in-manyof-the-worlds-cities&option=com_content
- MINAM. (2014). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2635-informe-nacional-de-la-calidad-del-aire-2013-2014%0Ahttp://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Informe-Nacional-de-Calidad-del-Aire-2013-2014.pdf>
- García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., García, O., Meulenert, Á., & Alcalá, J. (2013). Concentración de contaminantes SO₂, NO₂ y correlación con H₊, SO₄₋₂ y NO₃ – durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México, (2), 81–88.
- Arciniégas A. (2012). Diagnóstico y Control de Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales y Fracción Respirable Pm₁₀. Luna Azul, 19.
- EPA. (2011). Inhalation Rates. *Highlights of the Chinese Exposure Factors Handbook, September*, 40–60. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803125-4.00012-2>
- SENAMHI. (2019). *Informe de Vigilancia de la calidad del Aire en el Área Metropolitana de Lima y Callao*. 20, 1–13. https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/700/Vigilancia-de-la-calidad-del-aire-Lima-Metropolitana-ago_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reátegui Romero, W. (2018). *Estimación de la concentración de material particulado pm₁₀ y pm_{2.5} en el área metropolitana de lima utilizando un modelo euleriano.*

- <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3635/reategui-romero-warren.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- INEI. (2020). La población de Lima supera los nueve millones. *Oficina Técnica de Difusión*, 95–96. <http://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/la-poblacion-de-lima-supera-los-nueve-millones-y-medio-de-habitantes-12031/>
- Lizarraga, I., Pomalaya, J., Suarez, L. & Bendezu, Y. (2019). Dispersion of particulate material 2.5 emitted by roasted chicken restaurants using the AERMOD model in Huancayo Metropolitan, Peru. *Dyna*, 86(211), 346–353. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.78812>
- Gaviria, C., Benavides, P. & Tangarife, C. (2011). “ontaminación por Material Particulado (Pm 2,5 y Pm 10) y consultas por enfermedades.Revista Facultad Nacional de Salud Publica 29:241–50.
- Negrete, M. (2019). Análisis Del Cambio En La Exposición Personal a Ebc, Pm2.5 Y Co En Micro-Ambientes Y Modos De Transporte En La Localidad De Ciudad Bolívar Antes Y Después De La Implementación Del Sistema Transmisible. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/44556/u830689.pdf?sequence=1>
- Pacsi, S. (2016). Analisis Temporal Y Espacial De La Calidad Del Aire Determinado Por Material Particulado Pm 10 Y Pm 2 , 5 En Lima Metropolitana. *Anales Científicos*, 77(2), 273–283. https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/699/pdf_37
- Rojas, F. (2017). Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en Lima Metropolitana. Universidad Nacional Agraria La Molina Universidad Nacional Agraria La Molina. Tesis de Maestría.
- Ministerio del Ambiente, M. del. (2013). *Agenda de Investigacion Ambiental del 2013 al 2021*. http://www.minam.gob.pe/investigacion/wp-content/uploads/sites/19/2013/10/Agenda-de-Investigación-Ambiental_Interiores.pdf
- Franco Gantiva, J. A. (2014). *Estimación y Comparación de Exposición Personal en Diferentes Modos de Transporte en la Ciudad de Bogotá, Colombia*. 5, 1–19. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16938/u703246.pdf?sequence=1>
- Rodríguez, R. R., Yuleisy, R., & Blanco, P. N. (2016). *Nivel de exposición personal a material particulado inhalable PM 2.5 proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla*. 1–103. <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/290/1045717701-1140868213.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- OMS. (2021). *Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire*. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- MINAM. (2017). *Decreto Supremo No. 003-2017-MINAM*. 6–9; <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-003-2017-MINAM.pdf>.
- SENAMHI. (2015). *Perú: Temperatura promedio, máxima y mínima según departamento*. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1416/mapas.pdf
- Follos Pliego, F. (2012). *mediante el lenguaje estadístico R y paquetes adicionales como OPENAIR*. <https://docplayer.es/712267-Lenguaje-r-aplicado-al-analisis-de-datos-de-manual-basico-para-el-tratamiento-de-datos-de-calidad-del-aire-mediante-el-lenguaje-estadistico-r.html>
- SENAMHI. (2021). *Informe de Vigilancia de la calidad del Aire en el Área Metropolitana de Lima y Callao*. 1–24. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/960/Vigilancia-de-la-calidad-del-aire-área-metropolitana-de-Lima-y-Callao-feb-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- INEI. (2020). Instituto Nacional de Estadística e Informática. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística e Informática: <http://censo2017.inei.gob.pe/>
- MINAM. (2019). *Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire* (p. 102). <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-que-aprueba-protocolo-nacional-monitoreo-calidad>
- US EPA (2009). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment); http://www.epa.gov/swerrims/riskassessment/ragsf/pdf/partf_200901_final.pdf