



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Asociación entre la exposición a contaminación ambiental crónica y aguda de PM_{2.5} y las visitas a salas de emergencia por neumonía en Lima Metropolitana durante el 2019 en menores de 5 años que residen en diez distritos con monitoreo ambiental.

Autor:

Rosa Milagros Chuchon Cisneros

Tesis para optar el título profesional de

Licenciado en biología

Asesor:

Dr. Gustavo Francisco Gonzales Rengifo

LIMA-PERÚ

2024

Asociación entre la exposición a contaminación ambiental crónica y aguda de PM2.5 y las visitas a salas de emergencia por neumonía en Lima Metropolitana durante el 2019 en menores de 5 años que reside

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	www.paho.org Fuente de Internet	1%
4	N. Soldevila Bacardit, E. Vinyoles Bargalló, J. Agudo Ugena, L. Camps Vila. "Contaminación atmosférica, riesgo cardiovascular e hipertensión arterial", Hipertensión y Riesgo Vascular, 2018 Publicación	<1%
5	issuu.com Fuente de Internet	<1%
6	docplayer.es Fuente de Internet	<1%

5.5.6.	Modelo de regresión	26
5.5.7.	Subanálisis por grupo etario	28
5.5.8.	Subanálisis por estación del año	28
5.5.9.	Aspectos éticos del estudio	29
6.	RESULTADOS	29
6.1.	Características sociodemográficas y de lugar del área de Estudio	29
6.2.	Características descriptivas del PM2.5 y las emergencias por neumonía	31
6.3.	Distribución de las emergencias por neumonía y PM2.5 Por semana epidemiológica	36
6.4.	Correlación múltiple	38
6.5.	Asociación entre las emergencias por neumonía y la exposición aguda a PM2.5	39
6.6.	Asociación entre las emergencias por neumonía y la exposición crónica a PM2.5	40
6.7.	Subanálisis por edad	41
6.8.	Subanálisis de asociación por estación del año	42
7.	DISCUSIÓN	43
8.	LIMITACIONES Y FORTALEZAS	48
9.	CONCLUSIONES	50
10.	RECOMENDACIONES	51
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
12.	ANEXOS	60
12.1	ANEXO 1: Ubicación de los monitores de SENAMHI	60
12.2	ANEXO 2: Datos excluidos según los criterios de exclusión	61
12.3	ANEXO 3: Criterio de equi-dispersión	62
12.4	ANEXO 4: Distribución de las emergencias según el hospital de atención	63
12.5	ANEXO 5. Distribución de la variable de exposición y Respuesta	63

RESUMEN

Cerca de 7 millones de personas mueren de forma prematura anualmente debido a contaminantes atmosféricos como el material particulado <2.5 micrones (PM_{2.5}). La exposición a PM_{2.5} es un factor de riesgo para desarrollar enfermedades respiratorias ya que puede acumularse en los alvéolos, favorecer procesos inflamatorios, y afectar al sistema inmunológico del huésped. En conjunto aumenta la susceptibilidad a futuras infecciones. En el Perú, se registraron 35.8 muertes por neumonía cada 100,000 habitantes durante el 2021. En Lima se reporta una asociación positiva entre la exposición a corto plazo de PM_{2.5} y enfermedades respiratorias en niños, sin embargo, aún no se ha evaluado el impacto de la exposición a largo plazo.

El objetivo de este estudio fue determinar la asociación entre la exposición crónica y aguda de PM_{2.5} y las visitas a emergencia por neumonía en menores de 5 años que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana durante el 2019 mediante un modelo lineal generalizado de la familia binomial negativa ajustado por temperatura, humedad, día de la semana, mes, distrito y población, con un diseño ecológico de series de tiempo.

La exposición aguda a PM_{2.5} no se asocia al incremento de las emergencias por neumonía y se observa que una exposición durante 90 días a concentraciones entre 29.16 µg/m³ y 38.8 µg/m³ aumentó en un 68% el número de emergencias por neumonía. Además, el promedio semanal de PM_{2.5} se asocia a un incremento de las emergencias semanales por neumonía en niños de 1 año (IRR: 1.039, IC95%: 1.004-1.074) y durante la estación de otoño (IRR: 1.048 IC 95%: 1.011-1.087) e invierno (IRR: 1.045 IC 95%: 1.020-1.071)

Por lo tanto, el PM_{2.5} y las emergencias por neumonía están asociadas cuando existe una exposición crónica de 90 días y con el promedio semanal de PM_{2.5}.

Palabras clave: PM_{2.5}, neumonía, niños, Lima, emergencias

ABSTRACT

Nearly 7 million people die prematurely annually due to air pollutants such as particulate matter <2.5 microns (PM_{2.5}). Exposure to PM_{2.5} is a risk factor for developing respiratory diseases since it can accumulate in the alveoli, promote inflammatory processes and affect the host's immune system. Altogether it increases susceptibility to future infections. In Perú, 35.8 deaths from pneumonia were recorded per 100,000 inhabitants during 2021. In Lima, a positive association between short-term exposure to PM_{2.5} and respiratory diseases in children is reported, however, it has not yet been evaluated the impact of long-term exposure.

The objective of this study was to determine the association between chronic and acute exposure to PM_{2.5} and emergency visits for pneumonia in children under 5 years of age residing in 10 districts of Metropolitan Lima during 2019 using a generalized linear model of the family negative binomial adjusted for temperature, humidity, day of the week, month, district and population, with an ecological time series design.

Acute exposure to PM_{2.5} is not associated with an increase in pneumonia emergencies and it is observed that exposure for 90 days to concentrations between 29.16 µg/m³ and 38.8 µg/m³ increased the number of pneumonia emergencies by 68%. Furthermore, the weekly average of PM_{2.5} is associated with an increase in weekly emergencies due to pneumonia in 1-year-old children (IRR: 1.039, 95% CI: 1.004-1.074) and during the autumn season (IRR: 1.048 95% CI : 1.011-1.087) and winter ((IRR: 1.045 95% CI: 1.020-1.071)

Therefore, PM_{2.5} and pneumonia emergencies are associated when there is a 90-day chronic exposure and with the weekly average of PM_{2.5}.

Keywords: PM_{2.5}, pneumonia, children, Lima, emergencies

1. INTRODUCCIÓN

La neumonía es una infección causada por microorganismos, siendo la causa viral y bacteriana las principales en niños (1). El virus más común es el virus respiratorio sincitial; y dentro de las bacterias son el *Streptococcus pneumoniae* y la *Haemophilus influenzae type B* (2). Su patogénesis consiste en una inflamación en el parénquima pulmonar ocasionada por los macrófagos que expresan citoquinas como IL-8, IL-1 y TNF-alfa para reclutar a los neutrófilos (3).

A nivel mundial se le considera como la segunda causa de muerte en menores de 5 años (4). En el Perú, se registra una tasa de mortalidad mayor (35.8 por 100,000 habitantes) a otros países de la región como Chile (5 por 100,000 habitantes), Argentina (13 por 100,000 habitantes), y países desarrollados como Estados Unidos (2.8 por 100,000 habitantes), y Canadá (1.6 por 100,000 habitantes) (5).

La exposición a contaminantes aéreos es un factor de riesgo que se encuentra asociado a un elevado número de muertes, similar a algunos factores conductuales (tabaco, alcohol, entre otros) (6). En el mundo se atribuyen 6.67 millones de muertes (95% IC: 5.90, 7.49) a esta exposición (6). Uno de estos contaminantes es el material particulado menor a 2.5 micrómetros de diámetro (PM_{2.5}), el cual se define como partículas sólidas o líquidas de composición heterogénea que comprende metales, hidrocarburos aromáticos policíclicos, minerales y compuestos orgánicos e inorgánicos (7). Estudios realizados en Lima encontraron que la composición del PM_{2.5} presenta elementos químicos como Ca, Fe, Pb, K, Na, V, Zn, Al, Ti, Mg, S, Si, Cl y As (8,9).

El PM_{2.5} puede ser emitido de forma directa desde una fuente, la cual es llamada PM_{2.5} primario, o debido a la reacción de otros compuestos en la atmósfera, este es conocido como PM_{2.5} secundario (10). La combustión de residuos sólidos es una fuente tanto de PM_{2.5} primario y secundario. Durante este proceso se emite PM_{2.5} primario (carbono negro, amonio, carbono elemental) (11), y otros gases como los óxidos de nitrógeno (12) que al reaccionar forman nitratos, los cuales son PM_{2.5} secundario (10).

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas en el tiempo tienen un patrón que depende de las condiciones atmosféricas y sociales. En Lima Metropolitana, los días laborables de lunes a sábado, presentan mayor concentración de $PM_{2.5}$, por la alta demanda en el uso del transporte público (13). Esto también ocurre, en los meses de invierno y otoño ya que las bajas temperaturas, y la alta humedad relativa favorecen la producción de $PM_{2.5}$ secundario (16,14,15).

Adicionalmente, el $PM_{2.5}$ tiene un patrón espacial. Se reporta que, en los distritos ubicados en la parte noreste de Lima como Ate, San Juan de Lurigancho o Puente Piedra los niveles de contaminación son mayores debido a la dirección suroeste de los vientos que permite la acumulación de $PM_{2.5}$ en dichos distritos (16).

Estas partículas por su pequeño tamaño pueden acumularse en los alvéolos y predisponer al organismo a enfermedades respiratorias (17). Según el Global Burden disease (2019), el 13.96% de muertes por infecciones respiratorias en niños menores de 5 años está asociada a la exposición de este material particulado (18).

La exposición a $PM_{2.5}$ se encuentra asociado a un incremento en el número de visitas al hospital. En menores de 14 años se registró que durante una exposición en el mismo día del evento, las emergencias por enfermedades respiratorias aumentaron en 1.91% (IC 95%: 0.60%, 3.23%) por cada incremento del rango intercuartil ($57.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (19). Estudios conducidos en menores 18 años y 5 años reportan un aumento del 8% (Exceso de Riesgo % (ER): 1.8% 95% IC: 0.5%–3.1%) (20) y 1.27% (Rate Ratio (RR):1.0127 95% IC: 1.0023-1.0231) de hospitalizaciones por cada aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (21).

Asimismo, en Lima (Perú), se encontró un incremento de las emergencias por neumonía asociado a la exposición a corto plazo de $PM_{2.5}$ en diferentes grupos etarios. En una población de 18 a 64 años se encontró un incremento del 10% (RR: 1.10, IC: 1.07-1.13) por cada aumento de $6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mismo día del evento (22) mientras que en menores de 5 años fue mayor, con un incremento del 17% en las consultas externas, por cada aumento de $7.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante una exposición de 1 semana (RR: 1.17, IC: 1.11-1.23) (23).

Periodos de exposición de 1 mes a un año, son considerados como exposiciones a largo plazo o crónicas (24). El efecto del PM_{2.5} durante periodos largos no se ha evaluado en Lima. A pesar de que en otros estudios se ha reportado que la exposición durante 12 meses de PM_{2.5} en niños menores a 5 años se ha asocia con el desarrollo de sintomatología de infecciones respiratorias a partir del cuarto mes de exposición junto con un comportamiento dosis-dependiente (25).

En el 2019, Lima Metropolitana el promedio anual de PM_{2.5} fue 31 µg/m³, lo cual supera el límite anual de la OMS (5 µg/m³) y del MINAM (25 µg/m³) (26). Siendo la neumonía una de las principales causas de muerte en niños menores de 5 años, este estudio busca evaluar su asociación con el material particulado en una ciudad con alta concentración de PM_{2.5} y una alta tasa de incidencia por neumonía como lo es Lima

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La neumonía es la segunda causa de muerte en niños menores de 5 años, y uno de los factores de riesgo asociado a este es la exposición a contaminantes aéreos. Considerando que Lima Metropolitana es una de las ciudades más contaminadas de la región se formula la siguiente pregunta:

¿Existe una asociación positiva entre la exposición aguda o crónica a PM_{2.5} y las visitas a salas de emergencias por neumonía en menores de 5 años que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana durante el 2019?

3. HIPÓTESIS

- Existe una asociación directa estadísticamente significativa entre la exposición aguda y crónica a PM_{2.5} y las visitas a salas de emergencias por neumonía en menores de 5 años que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana durante el 2019.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivos generales

- Determinar la asociación de las visitas a salas de emergencias por neumonía en menores de 5 años expuestos aguda o crónicamente a $PM_{2.5}$ que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana durante el 2019.

4.2. Objetivos específicos

1. Reconocer el patrón estacional conjunto de las visitas a salas de emergencias por neumonía y los niveles de $PM_{2.5}$ registradas en cada semana epidemiológica del año 2019.
2. Calcular la asociación de las visitas a salas de emergencias por neumonía expuestos a un periodo agudo de $PM_{2.5}$ en menores de 5 años que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana durante el 2019.
3. Evaluar la asociación de las visitas a salas de emergencias por neumonía expuestos a un período crónico de $PM_{2.5}$ en menores de 5 años que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana durante el 2019.
4. Identificar la asociación entre las visitas semanales a salas de emergencia por neumonía y el promedio semanal de $PM_{2.5}$ por grupo etario.
5. Hallar la asociación entre las visitas semanales a salas de emergencia por neumonía y el promedio semanal de $PM_{2.5}$ por estación del año.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Diseño de estudio

Para este estudio, se contó con registros individuales de emergencias y registros horarios de $PM_{2.5}$ para los 10 distritos seleccionados de Lima Metropolitana en una población menor a 5 años ocurridas durante el 2019.

En cada uno de los 10 distritos, se calculó el promedio diario de $PM_{2.5}$ y se emparejó con el total de emergencias registradas en dicho día, generando así una serie de tiempo diaria de 1 año en cada distrito. Debido a que los datos se agruparon por día, el diseño de estudio es ecológico con una unidad de análisis diaria.

Los diseños ecológicos se caracterizan por tener los datos de exposición y de respuesta de forma agrupada ya sea por lugar o tiempo. Por lo tanto, no se conoce la exposición individual. Además, en este diseño es frecuente usar base de datos secundarios.

5.2. Obtención de datos

La concentración diaria de $PM_{2.5}$ en cada distrito se descargó de la plataforma web de datos abiertos del gobierno peruano, el cual provee información registrada por los monitores de SENAMHI (27).

A través del portal de transparencia del MINSA, se obtuvieron las emergencias diarias por neumonía en menores de 5 años en Lima Metropolitana durante el 2019. A cada sujeto con neumonía se le asignó el distrito de su residencia para así asociarlo con el $PM_{2.5}$ del distrito.

Los factores meteorológicos como la temperatura y humedad relativa pueden influir en la concentración de $PM_{2.5}$. Estas variables se descargaron y solicitaron a través de la plataforma web de SENAMHI (28).

Los distritos estudiados poseen características sociales diferentes, entre ellos se encuentra la pobreza, el número de personas menor a 5 años por distrito, población por distrito, el número de fábricas de manufactura, residuos sólidos, y superficie habitable. Dicha información se recopiló de diferentes fuentes, las cuales se detallan a continuación:

- La pobreza monetaria se obtuvo a través del Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. (29).
- El número de personas menor a 5 años por distrito se descargó a través de la plataforma web del Repositorio Único Nacional de Información en Salud. (30)
- La población total por distrito se descargó a través de la plataforma web del Repositorio Único Nacional de Información en Salud. (31)
- El número de fábricas de manufactura por distrito proviene del Ministerio de Producción. (32)
- Los residuos sólidos municipales producidos anualmente generados por las viviendas, establecimientos comerciales, restaurantes, hoteles, mercados, instituciones públicas y privadas, servicio de barrida, y limpieza de espacios públicos por distrito se adquirieron por el Ministerio del Ambiente. (33)
- La superficie habitable por distrito fue proporcionada por la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, a diferencia de la superficie total, la superficie habitable no considera las zonas que no se encuentran habitadas debido a ser de difícil acceso. (34)

5.3. Descripción del área de estudio y población

5.3.1. Descripción sociodemográfica del área de estudio

El área de estudio abarcó 10 distritos de Lima Metropolitana (Ate, Carabaylo, Jesús María, Lurigancho, Puente Piedra, Santa Anita, San Borja, San Juan de Lurigancho, San Martín de Porres y Villa María del Triunfo), en los que se encontraban los monitores de PM_{2.5} a tierra, y cuyas direcciones se encuentran en el anexo 1.

Se ha reportado que la quema de residuos sólidos y la producción de plásticos, textiles, pinturas, cementos, y otras actividades industriales son fuente de emisión de PM_{2.5} (14), por ello se describió cada distrito según la cantidad de residuos municipales producidos anualmente (Tn/año) y la densidad de fábricas de manufactura (fábricas/km²).

Asimismo, se calculó la densidad poblacional de cada distrito, ya un distrito con mayor densidad poblacional podría influir en la transmisión de patógenos respiratorios.

También se describió cada distrito según el porcentaje de pobreza monetaria. Este indicador nos permite ver el porcentaje de personas que no poseen el recurso monetario mínimo para cubrir los gastos alimenticios y no alimenticios mínimos que tiene una persona.

5.3.2. Descripción de población

Se realizó la descripción de la población según edad, zona de residencia, etiología del agente causal de neumonía, y el centro de salud en el cual fueron atendidos.

Basándose en los criterios de inclusión y exclusión se eliminó un porcentaje menor al 10% de observaciones (para mayor detalle revisar el anexo 2). Estos criterios son:

5.3.2.1. Criterios de inclusión

- Emergencias registradas durante el 2019
- Pacientes atendidos en hospitales de los 43 distritos de Lima Metropolitana
- Pacientes con un diagnóstico CIE-10 de neumonía (J12-J18)
- Pacientes con edad entre 0 a <5 años
- Pacientes que residen en un distrito con monitor ambiental de PM_{2.5}.

5.3.2.2. Criterios de exclusión

- Pacientes sin registro del tipo de diagnóstico de neumonía (2.64%; 53 observaciones, anexo 2)
- Pacientes con un tipo de diagnóstico de neumonía presuntivo o repetido (7.13%; 143 observaciones).

5.4. Variables

5.4.1. Variable de respuesta

La variable respuesta es el conteo diario de neumonías en emergencias pediátricas en menores de 5 años a nivel distrital, obtenidos de la Hoja de Registro de Atención Diaria y otras Actividades de Salud (HIS).

5.4.2. Variable de exposición

La variable de exposición es la concentración de $PM_{2.5}$ registrada en cada ventana de tiempo para un periodo agudo y crónico en cada distrito las cuales fueron:

- Periodo agudo
 - Lag 0: La concentración de $PM_{2.5}$ registrada el mismo día del evento.
 - Lag 1: La concentración de $PM_{2.5}$ un día previo al evento.
 - Lag 2: La concentración de $PM_{2.5}$ en el segundo día previo al evento.
 - Lag 01: Promedio de $PM_{2.5}$ desde el mismo día del evento hasta 1 día previo al evento.
 - Lag 02: Promedio de $PM_{2.5}$ desde el mismo día del evento hasta 2 días previos al evento.
 - Lag 03: Promedio de $PM_{2.5}$ desde el mismo día del evento hasta 3 días previos al evento.
 - Promedio por semana epidemiológica.

- Periodo crónico

- Lag 30: Promedio de $PM_{2.5}$ desde el mismo día del evento hasta 30 días previos al evento
- Lag 60: Promedio de $PM_{2.5}$ desde el mismo día del evento hasta 60 días previos al evento
- Lag 90: Promedio de $PM_{2.5}$ desde el mismo día del evento hasta 90 días previos al evento

En la **Figura 1** se representa un esquema de dichas ventanas.

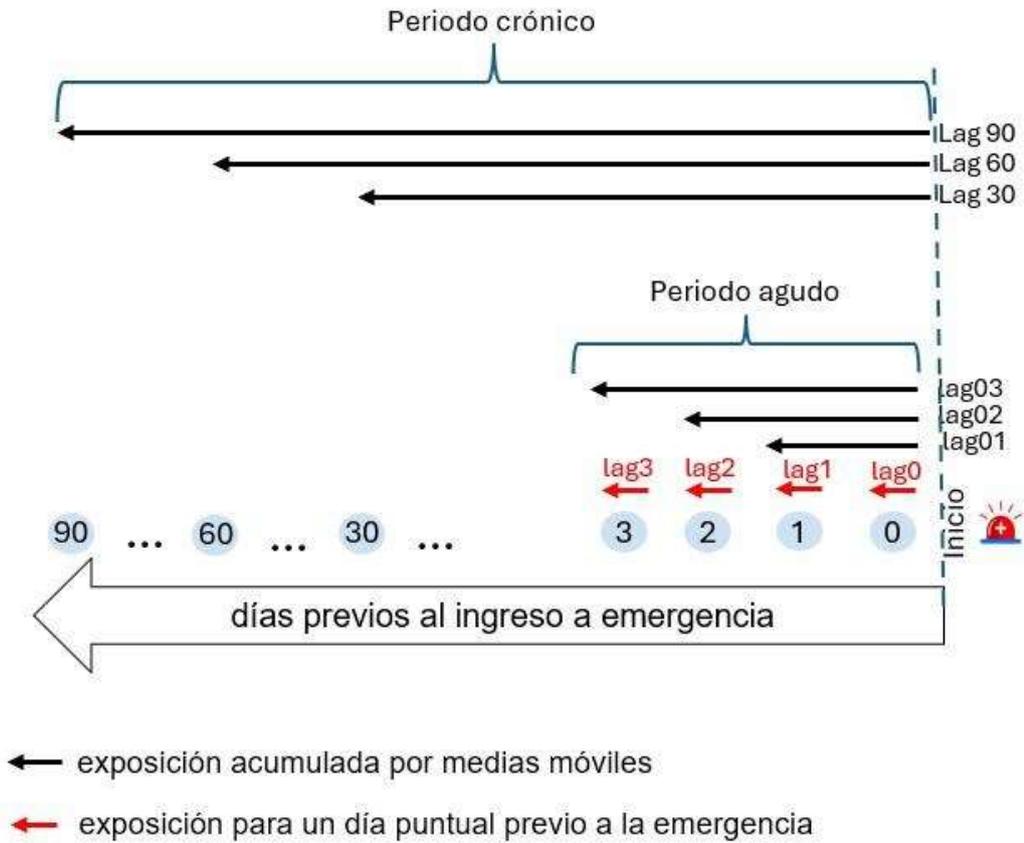


Figura 1. Ventanas de exposición para el periodo agudo y crónico.

Nota: Lag: exposición previa a la emergencia.

5.4.3. Covariables

a) Variables meteorológicas

Las covariables consideradas fueron la temperatura en centígrados (T) y humedad relativa en porcentaje (HR).

b) Variable de lugar

En este grupo se encuentra la variable distrito, la cual representa la localidad distrital de residencia del cual provienen los pacientes con neumonía.

También se encuentra la cantidad de basura municipal producida en cada distrito durante el 2019.

La densidad de fábricas de manufactura se calculó al dividir el número de fábricas de manufactura por distrito y la superficie habitable del distrito.

A su vez, se trabajó con la variable zona de estudio, la cual permitió dividir en 4 zonas al área de interés. Dicha zonificación se realizó según los criterios de SENAMHI. En el cual los distritos de Carabaylo, Puente Piedra, y San Martín de Porres se consideran como Lima Norte; los distritos de Jesús María y San Borja se consideran como Lima Centro; los distritos de Ate, Santa Anita, San Juan de Lurigancho y Lurigancho se consideran como Lima Este; y el distrito de Villa María del Triunfo se considera como Lima Sur.

c) Variables de tiempo

En este grupo tenemos 4 variables para organizar el tiempo. La primera, día de la semana, categoriza el tiempo en los 7 días de la semana. La segunda, semana epidemiológica, la cual inicia un domingo y termina el primer sábado de enero. De esta manera, se logra que se tenga al menos 4 semanas epidemiológicas, agrupando así el año en 52 semanas. La tercera, estación del año, permite dividir las fechas en verano, otoño, invierno y primavera. Por último, la variable mes, clasifica el estudio en 12 meses desde enero a diciembre.

d) Variables sociodemográficas

En este estudio, la variable sociodemográfica pobreza fue incluida como el porcentaje de pobreza monetaria (2018) para cada distrito; también se consideró el número de niños menores de 5 años (2019) para cada distrito, la cual permitió calcular la tasa de emergencias por neumonía.

En cuanto a la densidad poblacional, este es el ratio entre la población de cada distrito y la superficie habitable de dicho distrito. Al usar la superficie habitable, no se está considerando el área de difícil acceso para la vivienda.

5.4.4. Operacionalización de variables

En la siguiente tabla se muestra la matriz de operacionalización de variables del presente estudio, detallando los valores posibles y los criterios de medición.

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición	Valores posibles	Criterios de medición
Variable de desenlace			
Neumonía	Emergencias diarias de neumonía por distrito	Casos diarios posibles en un distrito: 0 a más	Cuantitativa discreta, Escala: Razón
Variable de exposición			
PM _{2.5}	Concentración de material particulado menor a 2.5 micras durante lags crónicos y agudos en cada distrito	Valores reportados por distrito: 0- 160 µg/m ³	Cuantitativa continua, Escala: Razón
Variabes meteorológicas			
Temperatura ambiental del distrito	Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor del ambiente	Valores reportados por distrito: 11°C-28°C	Cuantitativa continua, Escala: Intervalo
Humedad Relativa diaria del distrito	Cantidad de vapor de agua presente en el aire con respecto a la máxima posible para condiciones de presión y temperatura	Valores reportados por distrito: 43%-100%	Cuantitativa continua, Escala: Razón
Variabes de lugar			
Distrito	Localidad distrital de residencia del paciente	Carabayllo, Puente Piedra, San Martín de Porres, San Borja, Jesús María, Ate, San Juan de Lurigancho, Santa Anita, Lurigancho, Villa María del Triunfo	Cualitativa, politómica, Escala: nominal

Densidad de fábricas de manufactura	Número de fábricas de manufactura a nivel distrital según PRODUCE del 2021 entre la superficie habitable distrital	Valor reportado por distrito: 0.1-3.3	Cuantitativa discreta, Escala: Razón.
Residuos solidos	Toneladas (T) anuales de residuos sólidos emitidos por distrito según MINAM durante el 2019 entre la población total del distrito	406 T - 372,000 T	Cuantitativa continua, Escala: Razón
Densidad poblacional	Población distrital entre la superficie habitable por distrito	4.57 km ² -94.71 km ²	Cuantitativa continua, Escala: Razón
Zona de estudio	División geográfica del área de estudio según el SENAMHI	Lima norte, Lima sur, Lima este, Lima centro	Cualitativa politómica, Escala: nominal
VARIABLES DE TIEMPO			
Día de la semana	Clasificación del tiempo en los 7 días de la semana desde el domingo al sábado	0: Domingo; 1: Lunes; 2: Martes; 3: Miércoles; 4: Jueves; 5: Viernes; 6: Sábado	Cualitativa politómica, Escala: nominal
Semana epidemiológica	Cada semana epidemiológica comienza un domingo y termina un sábado	Semana 1 a la Semana 52	Cualitativa, politómica, Escala: nominal
Mes	Variable que agrupa en 30 o 31 días el tiempo generando 12 meses.	1: enero; 2: febrero; 3: marzo; 4: abril; 5: mayo; 6: junio; 7: julio; 8: agosto; 9: septiembre; 10: octubre; 11: noviembre, 12: diciembre	Cualitativa politómica, Escala: nominal
Estación del año	Las 4 estaciones meteorológicas durante el 2019 registradas en el área de estudio	Verano: inicio 21 diciembre, Otoño: inicio 20 marzo, Invierno: 21 junio, Primavera: 23 setiembre	Cualitativa, politómica, Escala: nominal

**Variables
sociodemográficas**

Pobreza	Porcentaje de pobreza monetaria estimada para cada distrito durante el 2018	0.05%-23.75%	Cuantitativa continua, Escala: Razón
Población menor de 5 años	Número de habitantes (hab.) menor a 5 años estimada por MINSA durante el 2019 en cada distrito	3,323 hab. - 97,925 hab.	Cuantitativa continua, Escala: Razón

5.5. Plan de análisis

5.5.1. Exploración de datos de PM_{2.5}

En esta fase se identificaron los días en el que no había ningún registro de PM_{2.5} en los 10 monitores ubicados en cada distrito durante el periodo de estudio (n=3650 días), donde se obtuvo que 2448 días no contaban con ninguna medición de PM_{2.5} (**Tabla 2**).

Tabla 2. Días sin registro de PM_{2.5} en los 10 monitores de Lima Metropolitana, 2019.

Distrito	Número de días (n)	Porcentaje (%)
Ate	227	9.27
Carabaylo	314	12.83
Jesús María	18	0.74
Lurigancho	331	13.52
Puente Piedra	321	13.11
Santa Anita	282	11.52
San Borja	239	9.76
San Juan de Lurigancho	189	7.72
San Martín de Porres	309	12.62
Villa María del Triunfo	218	8.91
Total	2448	100

Durante el 2019 los días con mediciones de PM_{2.5} para toda el área de estudio sumaron un total de 1202 días y fueron consideradas en los análisis posteriores (**Tabla 3**).

Según el MINAM, para poder calcular el promedio diario de PM_{2.5}, se requiere un mínimo de 18 horas registradas durante las 24 horas del día (34). Sin embargo, solo el 6.4% de los días estudiados no cumplieron con dicho criterio (**Tabla 3**).

Tabla 3. Número de horas para días con al menos 1 registro de PM_{2.5}

Distrito	24 horas	23 a 18 horas	17 a 12 horas	< 12 horas	Total
Ate	115 (83.33%)	7 (5.07%)	7 (5.07%)	9 (6.52%)	138 (100%)
Carabayllo	42 (82.35%)	4 (7.84%)	1 (1.96%)	4 (7.84%)	51 (100%)
Jesús María	331 (95.39%)	9 (2.59%)	4 (1.15%)	3 (0.86%)	347 (100%)
Lurigancho	26 (76.47%)	5 (14.71%)	2 (5.88%)	1 (2.94%)	34 (100%)
Puente Piedra	29 (65.91%)	8 (18.18%)	4 (9.09)	3 (6.82%)	44 (100%)
Santa Anita	67 (81.71%)	5 (6.09%)	6 (7.32%)	4 (4.88%)	82 (100%)
San Borja	116 (92.06%)	7 (5.56%)	1 (0.79%)	2 (1.59%)	126 (100%)
San Juan de Lurigancho	154 (87.5%)	15 (8.52%)	4 (2.27%)	3 (1.71%)	176 (100%)
San Martín de Porres	49 (87.5%)	5 (8.93%)	1 (1.79%)	1 (1.79%)	56 (100%)
Villa María del Triunfo	122 (82.99%)	9 (6.12%)	6 (4.08%)	11 (6.80%)	148 (100%)
Total	1051 (87.44%)	74 (6.16%)	36 (2.99%)	41 (3.41)	1202

5.5.2. Cálculo de ventanas de tiempo de PM_{2.5}

Luego de seleccionar los días con registros de PM_{2.5} se calculó la exposición para periodos crónicos y agudos. Según California Air Resources Board, exposiciones a PM_{2.5} por periodos mayores a 1 mes se consideran de largo plazo o crónico (24). Por ello en este estudio, la exposición crónica fueron las ventanas de tiempo de 30 a 90 días, y la exposición aguda fueron ventanas 3 y 7 días.

Para la exposición crónica se calculó la exposición acumulada a PM_{2.5} durante 30, 60 y 90 días. Para ello se generaron 3 ventanas de tiempo: Lag 30, Lag60 y Lag90.

Mientras que para la exposición aguda se evaluó el efecto de la concentración registrada en días previos a la emergencia de forma puntual (Lag1, Lag2, Lag3) y acumulada (Lag01, Lag02, Lag03).

Además, para los subanálisis por grupo etario y estación del año, se evaluó el efecto del promedio semanal de PM_{2.5}

Para el cálculo de estas ventanas de tiempo se siguió la siguiente metodología:

5.5.2.1. Cálculo de ventanas de tiempo para exposición crónica

Para este periodo se construyeron ventanas de tiempo de 30, 60 y 90 días (Lag30, Lag60, Lag90). En cada ventana de tiempo se promedió la concentración de PM_{2.5} durante estos días de acuerdo con la ecuación 1 (e₁).

$$\square \square \square \square = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n+1}$$

(e₁)

Donde *t* es un día específico, *n* son los días de la ventana de tiempo, y *x* es el valor de PM_{2.5} en un día específico.

Por ejemplo, para calcular la exposición de PM_{2.5} durante 30 días (Lag 30) para el día 1 de abril del 2019 se toma las concentraciones registradas desde esa fecha hasta 30 días atrás, el cual corresponde al 2 de marzo del 2019 y se realiza la siguiente operación:

$$\text{Lag } 30 = \frac{\sum_{i=0}^{30} x_i}{n+1}$$

$$\text{Lag } 30 = \frac{x_{t-0} + x_{t-1} + x_{t-2} + \dots + x_{t-30}}{31}$$

Donde X_{t-0} corresponde a la concentración de PM_{2.5} en el 1 de abril del 2019; X_{t-1} a la concentración en el 31 de abril, X_{t-2} a la concentración en el 30 de abril y así sucesivamente hasta llegar a X_{t-30} que corresponde a la concentración del 2 marzo.

5.5.2.2. Cálculo de ventanas de tiempo para exposición aguda

Las ventanas puntuales se construyeron según la ecuación 2 (e₁) y evaluaron el efecto de la exposición a PM_{2.5} un día previo a la emergencia (Lag 1), al segundo día previo a la emergencia (Lag2), y al tercer día previo a la emergencia (Lag 3).

$$x_{t-n} = x_t - x_{t-n} \quad (e_2)$$

Donde n es el número de días previos a evaluar, x es el registro de la variable de interés en un tiempo $t-n$, y t es un día específico.

Por ejemplo, la exposición puntual un día previo al 1 de abril del 2019, sería la concentración de PM_{2.5} registrado el 31 de marzo del 2019; la exposición puntual dos días previos al 1 de abril del 2019, sería la concentración de PM_{2.5} registrado el 30 de marzo del 2019; y la exposición puntual tres días previos al 1 de abril del 2019, sería la concentración de PM_{2.5} registrado el 29 de marzo del 2019.

Las ventanas acumuladas de PM_{2.5} son el promedio de hasta 3 días de este contaminante antes de la emergencia (un día=Lag 01, dos días=Lag 02, tres días=Lag 03) y se calcularon según la ecuación 3 (e₃).

$$\square \square \square \square = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n+1}$$

(e₃)

Donde t es un día específico, n son los días de la ventana de tiempo, y x es el valor de PM_{2.5} en un día específico.

Adicionalmente se consideró como una exposición aguda al promedio semanal de PM_{2.5}, la cual se empleó en el subanálisis por edad y estación del año.

5.5.3. Construcción de series de tiempo

Primero, los registros de emergencias por neumonía solicitados por el portal de transparencia del MINSA se filtraron según los criterios de inclusión y exclusión. Posteriormente, se agruparon diariamente para cada edad del niño en cada distrito, de tal manera que al final se generó 10 series de emergencias diarias, una para cada distrito en específico, la cual contenía el número de emergencias en: niños menores de 1 año, 1 año, 2 años, 3 años, 4 años y todas las edades para cada día.

Después se trabajó con los 1202 días que contaron con registros de PM_{2.5}. Cada día contaba con mediciones horarias de PM_{2.5} las cuales fueron promediadas por día en cada distrito. Esto resultó en 10 series diarias de PM_{2.5}, cada una para un distrito en específico. Las cuales se emparejaron con la temperatura y humedad relativa registrada en dicho día y distrito.

Luego a cada serie de tiempo se le agregó el número de emergencias registrada en un día en específico. La información de cada distrito se agrupó mediante el comando append, el cual añade un conjunto de datos al final de otro conjunto de datos.

A dicha base de datos final, se le agregó la variable día de semana, mes, semana epidemiológica, y la población de niños menores de 5 años.

Cabe mencionar que, para el distrito de Ate no se contó con el reporte de temperatura y humedad para el año 2019, por ello se consideró reemplazarlo con los registros de Santa Anita, debido a que fue la estación meteorológica más cercana.

5.5.4. Análisis descriptivo del PM_{2.5} y las emergencias por neumonía

Primero se analizó la simetría y la variabilidad de la variable respuesta, de exposición, y meteorológicas mediante un histograma, y los parámetros de skewness y curtosis.

Luego se aplicó la prueba Kolmogórov-Smirnov para evaluar la normalidad de la variable de exposición y las variables meteorológicas, no se aplicó esta prueba a la variable respuesta, porque esta es de conteo.

Se describieron los niveles de PM_{2.5} por distrito de estudio y estación del año. Para ello se reportó la mediana, valor máximo y mínimo, y el rango intercuartil.

Asimismo, se calculó la tasa y frecuencia de las visitas a salas de emergencia por neumonía en cada distrito, además se reportó la frecuencia de emergencias por edad del niño, etiología de la neumonía y por centro de salud en el cual fueron atendidos.

Además, se hizo una representación gráfica de la tendencia del PM_{2.5} y las emergencias por neumonía por semana epidemiológica en el área de estudio y por zona.

5.5.5. Correlación múltiple

En esta etapa, se realizó una correlación múltiple entre la variable respuesta (emergencias diarias por neumonía), de exposición (PM_{2.5}) y

variables meteorológicas (temperatura y humedad diarias)

En la fase previa se determinó que ninguna de estas variables sigue una distribución normal, por ello se realizó una correlación múltiple utilizando el coeficiente de Spearman.

La correlación múltiple permitió evaluar la posible multicolinealidad entre las covariables (variables correlacionadas en más del 70%) las cuales se retiraron en el modelo.

5.5.6. Modelo de regresión

Debido a que la variable respuesta es de conteo, se verificó el supuesto de equi-dispersión (media=varianza) de la regresión lineal generalizada de la familia Poisson y se cuantificó la cantidad de 0 en la variable respuesta. Debido a que no se cumplió con el criterio de equi-dispersión (ver anexo 3) y existía exceso de 0 (2273 días no registraron emergencias por neumonía.) en la variable respuesta, se optó por realizar una regresión de la familia binomial negativa.

Por otro lado, las potenciales covariables a considerar fueron la temperatura y humedad relativa. Estas fueron consideradas porque actúan como factores confusores en la asociación entre las emergencias por neumonía y el $PM_{2.5}$. Además, se encuentran correlacionadas con las emergencias por neumonía y el $PM_{2.5}$.

A su vez en el modelo se consideró agregar la variable distrito para así considerar la variabilidad que puede existir entre distritos y a la variable población menor de 5 años, para así ajustar que algunos distritos tengan más población y por ende más emergencias.

Además, para tomar en cuenta las fluctuaciones del número de visitas a emergencias por neumonía y la concentración diaria de $PM_{2.5}$ que ocurre durante periodos cortos, se agregó la variable mes y día de la semana en el modelo. Esto permite, por ejemplo, controlar la disminución de $PM_{2.5}$, que ocurre cada fin de semana respecto a los días laborables.

Las variables se fueron agregando una por una al modelo y se registró el valor del AIC y el pseudo R^2 en cada paso. Se seleccionó el modelo con menor valor del Criterio de Información de Akaike (Akaike Information Criteria, AIC) y mayor pseudo R^2 . El valor de AIC permite comparar la calidad de ajuste de múltiples modelos, un valor menor

indicaría que ese modelo se ajusta mejor a los datos, y el pseudo R^2 es una medida que indica cuánta variabilidad de los datos puede ser explicada por el modelo.

Por lo que para este estudio se siguió la ecuación 4 (e4):

$$\ln\left(\frac{E}{P}\right) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \log_e z \quad (e_4)$$

Donde z es la población menor a 5 años registrada en cada distrito, x_1 es la concentración de $PM_{2.5}$, x_2 es la temperatura, x_3 es la humedad, x_4 es el día de la semana, x_5 es el mes del año, y x_6 es el distrito. La población se incorporó como logaritmo, lo cual permite ponderar el estimador según la población del distrito.

En este estudio se analizaron casos nuevos, por ello se calculó la razón de tasas de incidencia (Incidence Rate Ratio, IRR). El IRR permite conocer en cuanto por ciento incrementan las visitas a salas de emergencias por cada incremento de $1 \mu\text{g}$ de $PM_{2.5}$. Para calcular el IRR, se sigue la siguiente ecuación (ecuación 5, e5):

$$\text{IRR} = e^{\alpha_1} \quad (e_5)$$

Se empleó la ecuación 1 para calcular la asociación entre el número de emergencias diarias por neumonía con la exposición aguda y crónica de $PM_{2.5}$.

5.5.7. Subanálisis por grupo etario

La edad es un factor de riesgo para desarrollar enfermedades respiratorias debido a que el sistema respiratorio inmune no se encuentra totalmente desarrollado (35). Por ello, se realizó un subanálisis de la asociación para los siguientes grupos etarios: niños menores de 1 año, 1 año, 2 años, 3 años y 4 años de edad.

La asociación se realizó entre las emergencias de neumonías y la concentración de $PM_{2.5}$ registrada en cada semana epidemiológica empleando una regresión binomial negativa bajo el siguiente modelo:

$$\lambda\left(\frac{z}{x_5}, x_5\right) = \lambda\left(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \log_e z\right)$$

Donde z es la población menor a 5 años registrada en cada distrito, x_1 es la concentración de $PM_{2.5}$, x_2 es la temperatura, x_3 es la humedad, x_4 es el mes del año, y x_5 es el distrito.

5.5.8. Subanálisis por estación del año

La temperatura y humedad relativa pueden influir en los niveles de $PM_{2.5}$ y en la frecuencia de infección de neumonía. Es por ello que se evaluó la asociación entre las emergencias semanales por neumonía y la concentración semanal de $PM_{2.5}$ por cada trimestre del año, que es el lapso de meses en el cual se observa un cambio de estas condiciones meteorológicas.

En el subanálisis las emergencias por neumonía, $PM_{2.5}$ y otras covariables se agruparon por semana epidemiológica para disminuir la sobredispersión debido al exceso de valores 0 en las variables respuesta.

Por último, se empleó el programa STATA v 17 para el análisis de datos y elaboración de gráficas.

5.6. ASPECTOS ÉTICOS

El presente estudio cuenta con el código SIDISI 210880 y fue aprobado por el comité de ética, con categoría exento, el día 15 de agosto del 2023.

6. RESULTADOS

6.1. Características sociodemográficas y geográficas del área de estudio

A continuación, describiremos las principales variables sociodemográficas y geográficas presentes en el área de estudio:

- a) La densidad poblacional muestra cuántas personas existen por kilómetro cuadrado. A mayor cantidad de personas por kilómetro cuadrado, aumenta la probabilidad de transmisión de patógenos infecciosos (36). En el área de estudio, se observa que los distritos con mayor densidad poblacional son Santa Anita (22,715.15 hab/km²), ubicado en Lima Este, y San Martín de Porres (25,351.94 Hab/km²), ubicado en Lima Norte (**Tabla 4**).
- b) Una de las fuentes de contaminación de PM_{2.5} proviene de la quema de residuos sólidos y la actividad manufacturera. En este escenario de estudio se encontró que el 75.72% de las fábricas manufactureras y el 49.07% de la basura anual se produce en Lima Este. También, esta zona posee los distritos con mayor densidad de fábricas (Ate: 3.3 fábricas/km² y Santa Anita: 3.1 fábricas/km²) (**Tabla 4**).
- c) Respecto a la pobreza monetaria, el monto mínimo para satisfacer las necesidades alimenticias y no alimenticias fue de 344 soles en el 2018 (29). Aquellas personas que no logran gastar más de este límite son consideradas pobres. Según este enfoque monetario, Lima Centro es la zona con distritos menos pobres (Jesús María: 0.55%, San Borja: 0.45%) a comparación de otras zonas. Las otras zonas (Lima Norte, Lima Sur y Lima Este) tienen niveles de pobreza similares que se encuentran en el rango de 17% - 22%, con excepción de Santa Anita (9.65%) y San Martín de Porres (10.35) (**Tabla 4**).

Tabla 4. Descripción sociodemográfica y de lugar del área de estudio

Zona de Lima	Distritos	Densidad poblacional	Número de fábricas	Densidad de fábricas	Residuos municipales	Pobreza (%)
Lima Este	Ate	13,575.35	161 (39.08%)	3,3	234,904.1 (15.35%)	17,20
	LUR	3,129.60	51 (12.38%)	0,7	75,119.95 (4.91%)	18,20
	SJL	18,805.46	67 (16.26%)	1,1	372,508.6 (24.34%)	17,70
	STA	22,715.15	33 (8.01%)	3,1	68,363.67 (4.47%)	9,65
Lima Norte	CRB	3,389.42	7 (1.70%)	0,1	129,278.60 (8.45%)	19,20
	SMP	25,351.94	28 (6.80%)	1,0	311,814.2 (20.37%)	10,35
	PPD	11,927.53	39 (9.47)	1,2	122,703.10 (8.02%)	22,70
Lima Centro	JM	16,653.61	5 (1.21%)	1,1	19,279 (1.26%)	0,55
	SBJ	11,946.79	14 (3.40%)	1,4	38,511.66 (2.52%)	0,45
Lima Sur	VMT	19,744.35	7 (1.70%)	0,3	157,984.80 (10.32%)	16,85

^a CRB: Carabaylo, JM: Jesús María, LUR: Lurigancho, PPD: Puente Piedra, STA: Santa Anita, SBJ: San Borja, SJL: San Juan de Lurigancho, SMP: San Martín de Porres, VMT: Villa María del Triunfo

^b densidad poblacional (Hab/km²) = población total / superficie habitable; calculada con la población distrital total para el 2019

^c densidad de fábricas (Fab/km²) = número de fábricas / superficie habitable

^d residuos municipales anuales en toneladas

6.2. Características descriptivas del PM_{2.5} y las emergencias por neumonía.

En cuanto a los niveles de PM_{2.5}, se observa que todos los distritos evaluados, con excepción de Jesús María y San Borja, superan el límite diario de PM_{2.5} establecido por la OMS (15 µg/m³) (37). Además, los distritos más contaminados se ubican en Lima Este y registran concentraciones que superan más de dos veces el límite diario de la OMS (**Tabla 5**).

Zona de Lima	Distritos ^a	Mediana (RIQ) ^b	Valor máximo	Valor mínimo
Lima Este	Ate	44.18 (29.95)	137.49	21.06
	LUR	47.69 (26.78)	126.58	20.58
	SJL	31.99 (14.69)	92.59	14.40
	STA	30.67 (12.41)	68.47	18.01
Lima Norte	CRB	21.43 (13.51)	148.24	11.75
	SMP	19.73 (10.54)	46.57	10.70
	PPD	29.26 (12.20)	53.32	14.30
Lima Centro	JM	17.91 (10.26)	66.90	7.81
	SBJ	13.63 (3.29)	28.71	7.51
Lima Sur	VMT	27.98 (18.30)	62.72	9.41

Tabla 5. Concentración diaria PM_{2.5} (µg/m³) por distrito en el año 2019

^a CRB: Carabayllo, JM: Jesús María, LUR: Lurigancho, PPD: Puente Piedra, STA: Santa Anita, SBJ: San Borja, SJL: San Juan de Lurigancho, SMP: San Martín de Porres, VMT: Villa María del Triunfo

^b RIQ: Rango Intercuartil

Debido a que las condiciones meteorológicas influyen en la concentración de $PM_{2.5}$ a continuación se describe los niveles de este contaminante por estación del año en cada zona de interés. Los distritos evaluados en Lima Este presentan niveles de $PM_{2.5}$ que son mayores en invierno respecto a otras estaciones del año (**Tabla 6**).

Sin embargo, al comparar solo las zonas de Lima Norte, Lima Centro y Lima Sur, se reportan niveles de $PM_{2.5}$ superiores durante la primavera (**Tabla 6**).

Tabla 6. Concentración de PM_{2.5} (μ/m³) por estación del año en Lima – 2019

Estación	Lima Este^a	Lima Norte^a	Lima Centro^a	Lima Sur^a
Verano	29.71667 (10.86667)	20.39792 (6.033333)	12.57917 (3.527899)	ND ^b
Otoño	34.89937 (17.47036)	20.64854 (10.38061)	16.29042(8.59875)	26.56167(10.42292)
Invierno	43.40042 (29.48366)	25.384 (15.26592)	20.28646 (7.7325)	21.99667 (11.56363)
Primavera	39.12833 (26.74375)	29.98375 (16.51042)	21.12417 (7.695415)	31.04854(12.12396)

^a Se reporta la mediana, y entre paréntesis se encuentra el rango intercuartil (Intercuartil range, IQR).

^b ND: No hubo datos para poder calcular la mediana y rango intercuartil.

Respecto a las emergencias por neumonía, se describieron según distrito, grupo etario y tipo de neumonía. En ese sentido, de los distritos estudiados, San Martín de Porres presenta la mayor tasa de emergencias por neumonía ($Tasas_{SMP}=12.44 \times 1,000$ hab.) y el distrito de San Borja, la menor tasa ($Tasas_{SBJ}=0.71 \times 1,000$ hab.) (**Tabla 7**).

Zona de Lima	Distritos ^{a,b}	Frecuencia (%)	Población menor a 5 años ^c	Tasa x 1,000 hab
Lima Este	Ate	103 (5.69)	58395 (15.96%)	1.76
	LUR	93 (5.14)	19876 (5.43%)	4.68
	SJL	684 (37.79)	5670 (1.55%)	6.99
	STA	64 (3.54)	54978 (15.02%)	3.11
Lima Norte	CRB	127 (7.02)	29051 (7.94%)	4.37
	SMP	468 (25.86)	97925 (26.76%)	12.44
	PPD	179 (9.89)	35423 (9.68%)	5.05
Lima Centro	JM	21 (1.16)	3323 (0.91%)	6.32
	SBJ	4 (0.22)	20596 (5.63%)	0.71
Lima Sur	VMT	67 (3.70)	40711(11.12%)	1.65
Total		1810 (100%)		

Tabla 7. Emergencias en niños menores de 5 años por distrito en Lima- 2019

^a CRB: Carabaylo, JM: Jesús María, LUR: Lurigancho, PPD: Puente Piedra, STA: Santa Anita, SBJ: San Borja, SJL: San Juan de Lurigancho, SMP: San Martín de Porres, VMT: Villa María del Triunfo

^b se reporta según el distrito de residencia de los niños

^cpoblación menore de 5 años durante el 2019 según REUNIS

Las emergencias por neumonía predominaron en los niños entre 0 a 11 meses (40.39%) y un gran porcentaje de todas las emergencias se clasificaron como neumonía no específica, es decir, que no se conoce al patógeno causante de la neumonía (70.61%) (**Tabla 8**).

Tabla 8. Emergencias en menores de 5 años por edad y tipo de neumonía

Grupo etario	Frecuencia	Porcentaje (%)
0 a 11 meses	731	40.39
1 año	410	22.65
2 años	281	15.52
3 años	221	12.21
4 años	167	9.23
Total	1810	100

Etiología de la neumonía	Frecuencia	Porcentaje (%)
Neumonía bacteriana	141	7.79
Neumonía viral	391	21.60
Neumonía no especificada	1278	70.61
Total	1810	100

6.3. Distribución de las emergencias por neumonía y PM_{2.5} por semana epidemiológica

En toda el área de estudio, las emergencias por neumonía y los niveles de PM_{2.5} tienen un patrón estacional distinto. Las emergencias por neumonía incrementan durante otoño y primavera, mientras que los niveles de PM_{2.5}, durante otoño e invierno (**Figura 2**).

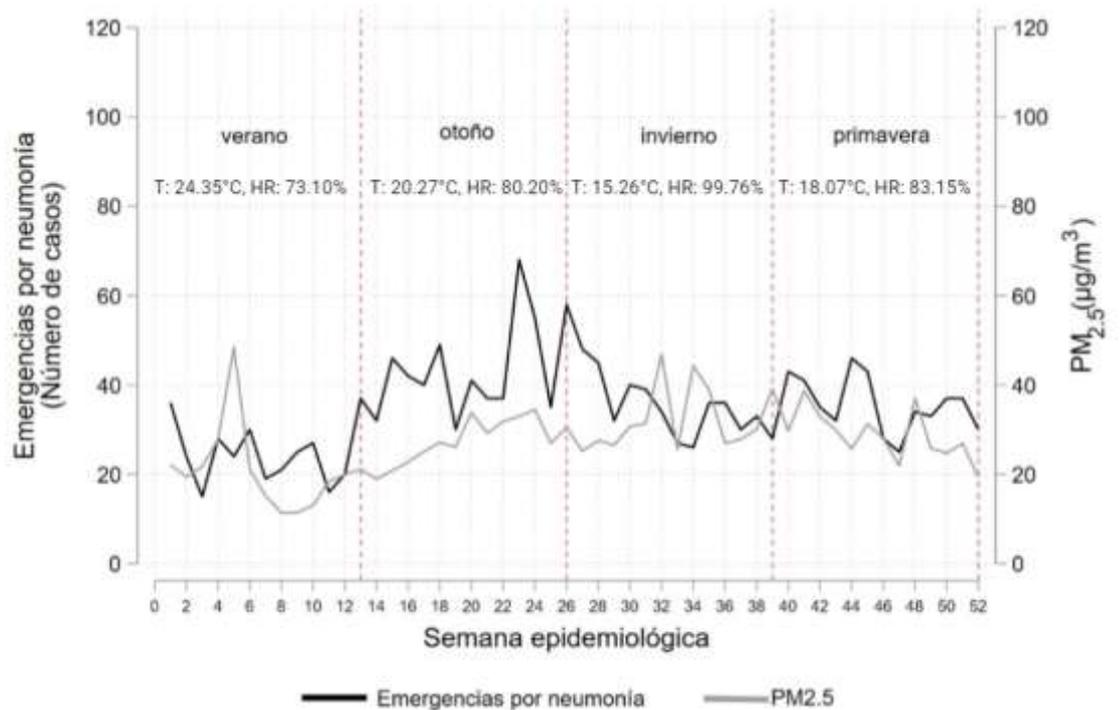


Figura 2. Emergencias por neumonía y concentración de PM_{2.5} por semana epidemiológica.

Nota: T= representa la temperatura promedio; HR= la humedad relativa promedio de la estación del año.

Al analizar por cada zona de estudio, se observa que las emergencias por neumonía aumentan durante otoño en Lima Este, mientras que en Lima Norte hay un incremento en cada cambio de estación. En Lima Centro y Sur no hay un patrón estacional debido a la falta de registros (**Figura 3**).

Además, el patrón estacional del $PM_{2.5}$ es diferente en cada zona. En Lima Este hay un aumento durante el otoño e invierno, pero en Lima Centro esto ocurre solo en otoño. Por otro lado, no se logra apreciar un patrón en las zonas de Lima Norte y Sur debido a la escasez de registros (**Figura 3**).

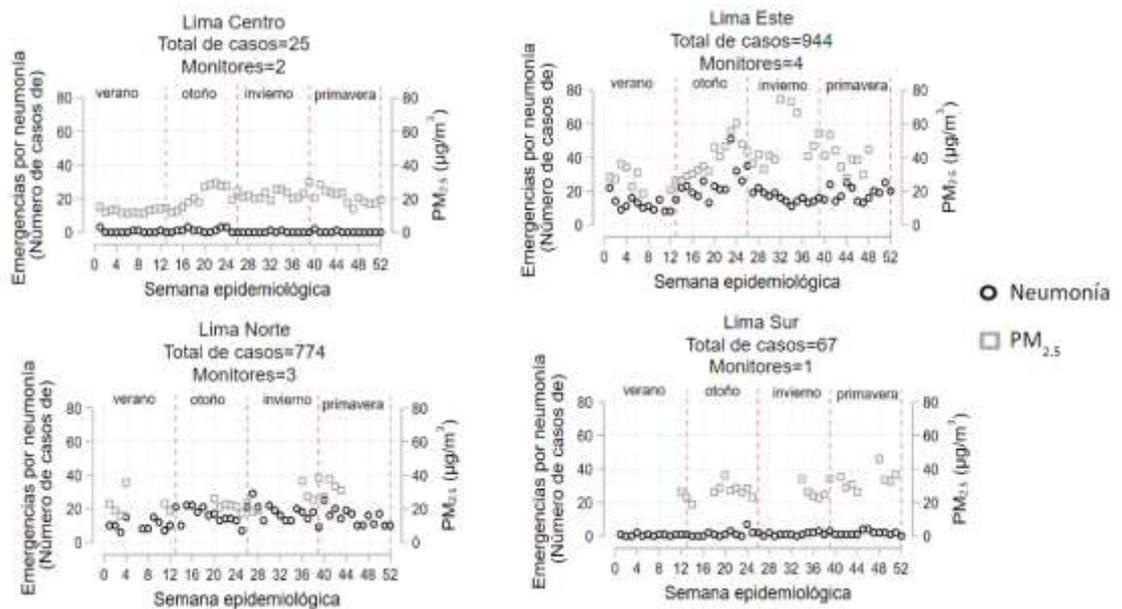


Figura 3. Emergencias por neumonía y concentración de $PM_{2.5}$ por semana epidemiológica en cada zona de estudio

Nota: Se omitió la concentración de $PM_{2.5}$ de la semana epidemiológica 4 ($111.1593 \mu g/m^3$) en Lima norte por ser un valor anómalo. Los distritos que conforman cada zona son: Para Lima Centro son Jesús María, San Borja; para Lima Este son Ate, Santa Anita, San Juan de Lurigancho, Lurigancho; para Lima Norte son Carabayllo, Puente Piedra, San Martín de Porres; y para Lima Sur es Villa María del Triunfo.

6.4. Correlación múltiple

A continuación, se presenta la correlación entre las variables meteorológicas (temperatura y humedad), las emergencias por neumonía y la concentración de PM_{2.5}.

Las emergencias por neumonía y la concentración de PM_{2.5} tienen una correlación positiva entre sí. Además, ambas tienen una correlación negativa con la temperatura y positiva con la humedad.

Asimismo, se observa que la temperatura y humedad correlacionan de manera positiva.

Tabla 9. Correlación múltiple

Variabes	PM_{2.5}	emergencias por neumonía	Temperatura
PM_{2.5}	X		
emergencias por neumonía	0.3031*	X	
Temperatura	-0.4030*	-0.0324*	X
Humedad	0.1574*	0.0786	0.7910*

*p<0.05, coeficiente de Spearman.

6.5. Asociación entre las emergencias por neumonía y la exposición aguda a PM_{2.5}

En la **Tabla 10** se muestra que este contaminante tiende a ser un factor de riesgo para el aumento en el número de emergencias por neumonía, sin embargo, no es significativo.

Tabla 10. Asociación de las emergencias diarias por neumonía por una exposición aguda a PM_{2.5}

Ventana de exposición	IRR			<i>p</i>
	<i>Coficiente B</i>	Exp(B)	IC 95%	
Periodo agudo				
Lag 0 (n=1059)	0.003	1.003	0.995-1.011	0.510
Lag 1 (n=1059)	0.003	1.003	0.996-1.010	0.428
Lag 2 (n=1059)	0.001	1.001	0.994-1.009	0.691
Lag 3 (n=1059)	0.005	1.005	0.992-1.008	0.968
Lag 01 (n=1085)	0.004	1.004	0.996-1.012	0.348
Lag 02 (n=1109)	0.003	1.003	0.995-1.012	0.461
Lag 03 (n=1132)	0.002	1.002	0.992-1.012	0.680

Nota: IRR: Incidence Rate Ratio, calculado como exp(Coeficiente B). IC 95%: intervalo de confianza al 95% de confianza. Modelo de regresión binomial negativa ajustado por temperatura, humedad, distrito, día de la semana, mes y población. Asociaciones significativas presentan el símbolo asterisco (*)

6.6. Asociación entre las emergencias por neumonía y la exposición crónica a PM_{2.5}

La exposición crónica durante 90 días a concentraciones entre 29.16 µg/m³ a 38.8 µg/m³ (cuartil 3, Q3) se asocia con un incremento del 68% de las emergencias por neumonía, respecto concentraciones más bajas (**Tabla 11**).

Tabla 11. Asociación de las emergencias diarias por neumonía por una exposición crónica a PM_{2.5}

Ventana de exposición	IRR			<i>p</i>
	Coefficiente <i>B</i>	Exp(B)	IC 95%	
Lag 30 días (n= 1,509)				
Q1 (4.9-21.49)	Ref.			
Q2 (21.50-28.81)	-0.124	0.883	0.648-1.202	0.428
Q3(28.82-38.59)	0.169	1.184	0.767-1.829	0.445
Q4(38.60-73.88)	0.166	1.181	0.711-1.962	0.522
Lag 60 días (n= 1,436)				
Q1 (4.9-22.39)	Ref.			
Q2 (22.40-28.97)	-0.173	0.841	0.595-1.189	0.328
Q3(28.98-38.59)	-0.039	0.962	0.624-1.482	0.860
Q4(38.60-70.68)	-0.282	0.754	0.428-1.327	0.327
Lag 90 días (n= 1,556)				
Q1 (4.9-22.53)	Ref.			
Q2 (22.54-29.15)	0.231	1.260	0.900-1.761	0.178
Q3 (29.16-38.8)	0.515	1.674*	1.20-2.503	0.012
Q4 (38.9-67.37)	0.385	1.470	0.885-2.438	0.136

Nota: IRR: Incidence Rate Ratio, calculado como exp(Coeficiente B). IC 95%: intervalo de confianza al 95% de confianza. Modelo de regresión binomial negativa ajustado por temperatura, humedad, distrito, mes y población. Asociaciones significativas presentan el símbolo asterisco (*)

6.7. Subanálisis por edad

Al realizar el análisis estratificado por edad, se observa que existe una asociación positiva entre las emergencias por neumonía y la concentración de PM_{2.5} por semana epidemiológica en los niños con 1 año de edad. En este grupo etario, cada incremento de 1 µg/m³ del promedio semanal de PM_{2.5} se asocia con un incremento en un 3.9% en el número de emergencias por neumonía (**Tabla 12**).

Tabla 12. Asociación entre los niveles de PM_{2.5} y emergencias semanales por edad

Edad	IRR	IC 95%	p
menores de 1 año	1.025	0.992-1.060	0.142
1 año	1.039	1.004-1.074	0.027*
2 años	1.027	0.986-1.069	0.201
3 años	1.024	0.964-1.088	0.439
4 años	1.017	0.959-1.079	0.563

Nota: IRR: Incidence Rate Ratio, calculado como $\exp(\text{Coeficiente B})$. IC 95%: intervalo de confianza al 95% de confianza. Modelo de regresión binomial negativa ajustado por temperatura, humedad, distrito, día de la semana, mes y población. Asociaciones significativas presentan el símbolo asterisco (*)

6.8. Subanálisis de asociación por estación del año

En la **Tabla 13** se presenta el subanálisis estratificado por estación del año, en el cual se observa que existe una asociación positiva entre la exposición a PM_{2.5} y el número de emergencias por neumonía durante otoño e invierno. Cada incremento de 1µg/m³ en el promedio semanal de PM_{2.5}, se asocia con un incremento del 4.8% y 4.5% en las emergencias por neumonía en otoño e invierno, respectivamente.

Tabla 13. Asociación entre las emergencias semanales por neumonía y la exposición semanal a PM_{2.5}

Trimestre	IRR	IC 95%	p
Verano	0.998	0.982-1.014	0.802
Otoño	1.048	1.011-1.087	0.012*
Invierno	1.045	1.020-1.071	0.000*
Primavera	1.010	0.966-1.057	0.646

Nota:

IRR: Incidence Rate Ratio IC 95%: intervalo de confianza al 95% de confianza. Modelo ajustado por temperatura, humedad, distrito, mes y población. Asociaciones significativas presentan el símbolo asterisco (*). Número de casos por trimestre: Diciembre-Enero-Febrero: 354; Marzo-Abril-Mayo: 455; Junio-Julio-Agosto: 547; Septiembre-Octubre-Noviembre: 460.

7. DISCUSIÓN

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la asociación entre la exposición aguda y crónica de $PM_{2.5}$ con el número de emergencias por neumonías en niños menores de 5 años que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana y fueron atendidos durante el 2019.

Respecto a los niveles de $PM_{2.5}$, los distritos seleccionados superaron los límites diarios de $PM_{2.5}$ establecidos por la OMS, con excepción de Jesús María y San Borja. Esto podría explicarse porque, a diferencia de Jesús María y San Borja, el resto de los distritos tienen un bajo nivel de gestión de residuos sólidos debido a la acumulación de basura en las calles, conllevando así al aumento de $PM_{2.5}$ mediante la quema de basura (38).

Además, la concentración de $PM_{2.5}$ fue mayor en los distritos ubicados en Lima Este. Esta situación sea posiblemente a la mayor cantidad de fábricas dedicadas a la elaboración de plásticos, textiles, y cerámicas que contribuyen a la emisión de $PM_{2.5}$ (11,12), y a los vientos que traen consigo contaminantes de otras zonas, los cuales se quedan atrapados en Lima Este debido a la presencia de cerros (16).

Adicionalmente, se observa que el número de emergencias por neumonía y la concentración de $PM_{2.5}$ presentan un patrón estacional. El patrón estacional del $PM_{2.5}$ consiste en un aumento de sus niveles durante otoño e invierno, lo cual podría deberse a que dichas condiciones meteorológica favorecen la producción de $PM_{2.5}$ secundario (14,15,16). Mientras que, para las emergencias por neumonía, se observa un incremento durante otoño, posiblemente debido a que las bajas temperaturas incrementan la supervivencia del virus como el virus sincitial respiratorio (58), y elevan la susceptibilidad de contraer neumonías mediante la disminución de la capacidad de movimiento de los cilios, que permiten el aclaramiento mucociliar en las vías respiratorias (59), y la secreción extracelular de vesículas antivirales (60).

La estacionalidad de las emergencias por neumonía no depende solo de las condiciones meteorológicas, sino también de las medidas de prevención como la vacunación o mantener los espacios ventilados.

En la presente tesis, se observó una disminución de las emergencias durante invierno, que ocurrió posiblemente por el inicio de las campañas de vacunación contra la neumonía en niños menores de 5 años (39).

Cabe mencionar que la eficacia de implementación de las medidas preventivas depende de los conocimientos y actitudes sobre estas medidas. Esto se evaluó en el 2017 mediante una encuesta realizada en San Martín de Porres a madres de niños menores de 5 años, a un total de 60 madres, de las cuales 31 tuvieron un conocimiento medio, 27 un conocimiento alto, y 2 un conocimiento bajo sobre las medidas preventivas (40). Una encuesta más reciente, realizada en el 2022, en Independencia a 70 mamás de niños menores de 5 años, encontró que el 91.4% de ellas conoce la importancia de mantener los ambientes ventilados para prevenir infecciones respiratorias agudas (41). Debido al pequeño número de participantes en las encuestas, no se conoce los conocimientos y actitudes de las madres de los niños menores de 5 años que residen en Lima Metropolitana sobre las medidas de prevención.

En cuanto a la asociación entre las emergencias por neumonía y la exposición a $PM_{2.5}$. La exposición aguda a $PM_{2.5}$ no se ha identificado por otros investigadores. Por ejemplo, en Atlanta, Darrow y colaboradores (47), no lograron encontrar una asociación entre la exposición a $PM_{2.5}$ y el número de emergencias por neumonía en niños menores de 5 años para una exposición de 3 días ($RR_{lag\ 03}$: 1.010 IC95%: 0.988-1.033). De igual manera en la presente tesis, no se logró identificar que la exposición por 3 días se encuentra asociado al aumento del número de emergencias ($RR_{lag\ 03}$: 1.002 IC95%: 0.992-1.012), a pesar de que los distritos seleccionados registraron niveles de $PM_{2.5}$ superiores a Atlanta.

Sin embargo, al evaluar una exposición crónica de $PM_{2.5}$, otras investigaciones sí lograron encontrar una asociación. Shi y colaboradores, evaluaron el efecto de la exposición anual a $PM_{2.5}$ sobre la probabilidad de desarrollar neumonía. En el cual reportaron que los niños de 3 a 4 años tienen una mayor probabilidad (OR: 1.16, IC 95%: 1.10-1.23) de desarrollar neumonía que los niños de 5 a más años ante una exposición anual de $62.0\ \mu g/m^3$ (44). En otro estudio, Balusubramani y colaboradores evaluaron la asociación de $PM_{2.5}$ y la tasa de neumonía clínica por cada 100 niños menores de 5 años, a una exposición anual de $PM_{2.5}$ que varió entre $77.8\ \mu g/m^3$ y

102.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en el cual se encontró que por cada incremento de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$, la tasa de neumonía clínica aumenta en un 6% (IRR: 1.006 IC 95%: 1.003-1.008). Según UNICEF, la neumonía clínica ocurre cuando existe la presencia de tos, respiración rápida y dificultad para respirar, pero no se cuenta con la confirmación de rayos X (45).

Tanto Shi y colaboradores como Balusubramani y colaboradores, evaluaron la exposición de $\text{PM}_{2.5}$ nivel distrital, por lo que son estudios de diseño ecológico, al igual que esta tesis.

En la presente tesis, también se encontró una asociación, la cual fue a concentraciones y periodos más cortos a lo reportado en los estudios previos, en específico se encontró que durante una exposición de 90 días en rangos entre 29.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 38.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ existe un incremento del 68% en las emergencias de neumonía (**Tabla 11**).

La concentración y el periodo de exposición no son los únicos factores a considerar para evaluar el efecto negativo del $\text{PM}_{2.5}$ sobre la salud, puesto que la composición del $\text{PM}_{2.5}$ también puede influir en ello. Darrow y colaboradores, encontraron que el carbono orgánico se asoció con un incremento significativo del 2% en las emergencias por neumonía. por cada incremento de 8.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante una exposición de 3 días (47).

El carbono orgánico es un componente del $\text{PM}_{2.5}$ que proviene del parque automotor (42). Debido a que el mayor porcentaje de $\text{PM}_{2.5}$ en Lima es emitido por este rubro (43), se requiere futuros estudios que evalúen la asociación entre este contaminante y la incidencia de neumonía en niños menores de 5 años.

Otro factor a considerar es la edad. Dávila y colaboradores reportaron un incremento de las consultas externas por neumonía semanales tanto para niños menores de 1 año como para aquellos de 1 a 4 años. En dicha investigación reportaron que por cada incremento de 7.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$, las consultas externas por neumonía aumentaron en un 19% y 16%, respectivamente. Este efecto se observó para una exposición de 1 semana antes del evento (23). Pero en otra investigación, Zhang y colaboradores, indican que la asociación entre el $\text{PM}_{2.5}$ y las infecciones respiratorias solo persiste en niños menores de 4 años. En dicho estudio, se reportó que por cada

incremento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ durante una exposición previo a 1 semana del evento, se relaciona con el aumento del 0.9%, 1% y 1.2% en las probabilidades de tener una infección respiratoria viral, en niños de 1, 2 y 3 años de edad, respectivamente ($\text{OR}_{1 \text{ año}}: 1.009 \text{ IC}95\%: 1.005-1.014$; $\text{OR}_{2 \text{ años}}: 1.004 \text{ IC } 95\%: 1.004 - 1.018$; $\text{OR}_{3 \text{ años}}: 1.012 \text{ IC } 95\%: 1.005-1.019$).

A diferencia de los estudios mencionados, durante el análisis estratificado por edad (**Tabla 12**) se observó solo una asociación en los niños con 1 año de edad, el cual consistió en el incremento en un 4% de las emergencias semanales de neumonía por cada aumento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el promedio semanal de $\text{PM}_{2.5}$.

Los niños con 1 año de edad experimentan una transición de una dieta exclusiva de leche materna a una con alimentos sólidos. Se ha reportado que la leche materna exclusiva es un factor protector para disminuir el riesgo de infecciones respiratorias (53) por lo que la transición de dieta podría explicar que la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ tenga un efecto en ese grupo etario.

Las condiciones meteorológicas también pueden influir en la asociación entre las emergencias por neumonía y el $\text{PM}_{2.5}$ por lo que se realizó un análisis estratificado por estación del año (**Tabla 13**). En el cual se observó que cada incremento de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ del promedio semanal de $\text{PM}_{2.5}$ se asocia en el aumento de las emergencias por neumonía en un 4.8% y 4.5% durante otoño e invierno, respectivamente. Li y colaboradores (54), también encontraron una asociación durante periodos de baja temperatura, donde reportan un incremento del 0.3% y 0.2% en los casos de neumonías en niños menores de 1 año y de 1 a 4 años respectivamente, por cada aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, durante el lag 5 (exposición de $\text{PM}_{2.5}$ 5 días ocurrido el evento). Esta asociación en bajas temperaturas podría deberse a que el aumento de $\text{PM}_{2.5}$ durante estas condiciones meteorológicas promueve la transmisibilidad de la bacteria *Streptococcus pneumoniae* y los adenovirus, ya que dichos patógenos emplean a este contaminante como un vector (57).

La asociación de $\text{PM}_{2.5}$ con las emergencias por neumonía podría deberse a que la exposición a este resulta en estrés oxidativo, disminución de la respuesta inmune, aumento de la inflamación y la virulencia de los patógenos, lo cual puede incrementar la susceptibilidad de contraer neumonía.

Se ha reportado la inducción a estrés oxidativo al exponer durante 24 horas a 3.125 µg/mL y 100 µg/mL de PM_{2.5}, a la línea celular bronquial (BEAS-2b). Además de incrementar las especies reactivas de oxígeno (ROS) se observa apoptosis en estas células (49). El estrés oxidativo inhibe la expresión de las proteínas claudinas, las cuales conforman las uniones estrechas de la barrera endotelial en la zona alveolar por lo que evitan el paso de los patógenos hacia el torrente sanguíneo (50).

Asimismo, la exposición a PM_{2.5} reduce la respuesta inmune contra patógenos infecciosos. Por ejemplo, la exposición de células epiteliales de las vías respiratorias a concentraciones de 4.5 µg/cm² de PM_{2.5} durante 5 días, incrementa la producción de la proteína MUC5AC que conforma el mucus que atrapa a los patógenos infecciosos, este exceso de mucus reduce el aclaramiento mucociliar (51). Otra respuesta inmune que se ve disminuida es la capacidad fagocítica de los macrófagos, esto se observó al exponer a ratones infectados con streptococcus a PM_{2.5} durante 3 semanas a 200 µg (52).

Además, el PM_{2.5} altera la microbiota respiratoria al incrementar la prevalencia de las siguientes bacterias: *Prevotella melaninogenica*, *Prevotella histicola*, *Veillonella dispar*, *Fusobacterium periodonticum*, y *Bacteroides coprocola*. El metabolismo de estas bacterias podría aumentar la capacidad de infección de los patógenos streptococcus y aumentar la inflamación en el parénquima pulmonar (52).

La exposición a PM_{2.5} también podría inducir a que los casos de IRA se compliquen hacia una neumonía. Por ejemplo, el mixovirus causa influenza, y este conduce a la disminución del aclaramiento mucociliar, facilitando así las infecciones bacterianas causantes de neumonía (46), como vimos la exposición a PM_{2.5} también puede reducir el aclaramiento mucociliar (51). Asimismo, Carol Ordoñez, reportó en la zona de Lima Sur de Lima Metropolitana, una correlación positiva entre casos de IRA (CIE10: J00-J11.1) y la neumonía (coeficiente de Pearson: 0.93) en niños menores de 5 años (48).

8. LIMITACIONES Y FORTALEZAS

- Esta tesis ha sido realizada enteramente a partir de base de datos de descarga libre, por lo que muestra la importancia en analizar los datos ya existentes en la plataforma de datos nacional para generar evidencia científica en la salud de una población vulnerable.
- En Lima los estudios de series de tiempo solo han evaluado el efecto del $PM_{2.5}$ en periodos cortos. La presente tesis, evalúa tanto periodos cortos como periodos crónicos.
- Además del $PM_{2.5}$, contaminantes gaseosos en el aire como SO_2 , y O_3 se encuentran asociadas al incremento de neumonía en niños entre 1 a 4 años. (14) Sin embargo, estos contaminantes no se midieron en el estudio. Tampoco, se logró medir el carbono orgánico, el cual es un componente del $PM_{2.5}$ asociado al incremento de emergencias por neumonía en niños menores de 5 años (20).
- Una limitación del uso base de datos secundaria es que no se cuenta con el control de calidad de datos. En los registros de $PM_{2.5}$ descargado de la plataforma de SENAMHI, se registraron 2448 días sin mediciones de $PM_{2.5}$, lo cual limitó el número de días para incorporar en el análisis.
- Debido a la incompletitud en el registro horario de $PM_{2.5}$ no se logró calcular las medias móviles de este contaminante, usar esta metodología permite controlar la estacionalidad del $PM_{2.5}$. Por ello, se incorporó la variable día de la semana y mes en el estudio.
- Las mediciones empleadas de $PM_{2.5}$ no cumplieron con el criterio de suficiencia de información establecido por el MINAM, el cual indica que el promedio de $PM_{2.5}$ diario requiere de un mínimo de 18 horas registradas. De los 1202 días incluidos en el análisis, 74 días no cumplieron con dicho criterio.
- En el estudio, 2448 días no registraron emergencias por neumonía. Debido a que estos datos provienen de una base secundaria, no conoce si fue debido un retraso en el registro de los datos por parte del hospital o también podría deberse a que los pacientes no buscaron atención médica de inmediato al presentar los síntomas, pues como se menciona en Centro

Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (CDC), existe una demora de 4.3 (IC 95%: 3.2-5.4) días en buscar atención médica desde el inicio de los síntomas (55).

- En estudios de series de tiempo, se obtienen resultados óptimos si se analizan períodos largos. En este estudio solo se consideró el año del 2019, debido a que no se contaba con los datos de temperatura y humedad relativa para poder ajustar la asociación entre $PM_{2.5}$ y el número de emergencias por neumonía.
- Al ser un estudio diseño ecológico, se está evaluando la exposición a nivel distrital. La cual no es igual en todos los individuos de un mismo distrito, ya que algunos pueden residir cerca de avenidas donde estarían expuestos, mientras que otros cerca de parques donde estarían menos expuestos.
- De las muertes por neumonía en niños menores de 5 años hasta la semana 48 del 2018, el 3.2% tuvo su primera atención en una farmacia, 7.6% en un curandero, y 17.7 en otros. Por lo que estos casos al no ser atendidos oportunamente pueden volverse una neumonía grave que se registre directamente en hospitalizaciones. Al usar emergencias, no se toma en cuenta dichos casos (55).

9. CONCLUSIÓN

- No hay suficiente evidencia para afirmar que la exposición aguda aumenta el número de emergencias por neumonía, pero si se logra evidencia que la exposición crónica durante 90 días se encuentra asociado al incremento de las emergencias por neumonía en niños en niños menores de 5 años que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana durante el año 2019
- El número de emergencias por neumonía y el promedio de concentración del $PM_{2.5}$ por semana epidemiológica en toda el área de estudio, tienden a incrementarse en periodos de baja temperatura como otoño e invierno.
- Para este estudio, no se puede concluir que la exposición aguda a $PM_{2.5}$ de hasta 3 días, tanto de forma acumulada o puntual, se encuentra asociado a un incremento en el número de emergencias por neumonía en niños menores de 5 años que residen en 10 distritos de Lima Metropolitana durante el año 2019.
- La exposición crónica durante 90 días entre concentraciones de $29.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $38.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se encuentra asociado a un incremento del 68% en el número diario de emergencia por neumonía .
- Se observa un incremento del 3.9% en el número de emergencias por neumonía semanales, por cada incremento de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ del promedio semanal de $PM_{2.5}$
- Por cada aumento de $1\mu\text{g}$ en el promedio semanal de $PM_{2.5}$ existe un incremento del 4.8% y 4.5% en el número de emergencias por neumonía durante el mes de otoño e invierno, respectivamente.

10. RECOMENDACIONES

Se debería reducir el límite de estándar de calidad ambiental permitido de $PM_{2.5}$ establecido por MINAM (límite diario: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (56) ya que se observó asociaciones directas estadísticamente significativas a partir de $29.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, se debería promover más fondos y capacidad logística no solo para la implementación de monitores en otros distritos sino también para asegurarse que estos funcionen adecuadamente de manera diaria. También, es importante señalar que se debe promover investigaciones con el fin de desarrollar pruebas de diagnóstico costo-efectivos, poco invasivas, y rápidas para un entorno de emergencia que permitan identificar la etiología de la neumonía.

Esta tesis, también permite mostrar a las autoridades competentes, que aún falta mejorar los sistemas de gestión de información en salud y ambientales, pues estos datos son importantes para desarrollar estudios de asociación como el presente, sin embargo, se requiere de una buena calidad y de la completitud de estos para tener resultados más precisos.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Guía técnica: Guía de práctica clínica para el diagnóstico y tratamiento de la neumonía en la niña y el niño [Internet]. [citado 16 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/informes-publicaciones/1091053-guia-tecnica-guia-de-practica-clinica-para-el-diagnostico-y-tratamiento-de-la-neumonia-en-la-nina-y-el-nino>
2. Rider AC, Frazee BW. Community-Acquired Pneumonia. *Emerg Med Clin North Am.* noviembre de 2018;36(4):665-83.
3. Jain V, Vashisht R, Yilmaz G, Bhardwaj A. Pneumonia Pathology. En: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 [citado 15 de marzo de 2024]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK526116/>
4. Villavicencio F, Perin J, Eilerts-Spinelli H, Yeung D, Prieto-Merino D, Hug L, et al. Global, regional, and national causes of death in children and adolescents younger than 20 years: an open data portal with estimates for 2000–21. *Lancet Glob Health.* 1 de enero de 2024;12(1):e16-7.
5. Dadonaite B, Roser M. Pneumonia. Our World Data [Internet]. 29 de febrero de 2024 [citado 2 de abril de 2024]; Disponible en: <https://ourworldindata.org/pneumonia>
6. Global Health Impacts of Air Pollution | State of Global Air [Internet]. [citado 20 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.stateofglobalair.org/health/global>
7. Seinfeld JH, Pandis SN. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2nd ed. Hoboken, N.J: J. Wiley; 2006. 1203 p.
8. Ilizarbe Gonzales GM, Valdiviezo LG, Rojas Quincho JP, Cabello Torres RJ, Ugarte Alvan CA. Chemical Characteristics and Identification of PM10 Sources in Two Lima Districts, Peru. *DYNA.* 5 de noviembre de 2020;87(215):57-65.
9. Ordóñez - Aquino C, Sánchez - Ccoyllo O. Caracterización química - morfológica del PM2,5 en Lima metropolitana mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). *Acta Nova.* marzo de 2018;8(3):397-420.
10. Seinfeld JH, Pandis SN. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2nd ed. Hoboken, N.J: J. Wiley; 2006. 1203 p.
11. Yang HH, Luo SW, Lee KT, Wu JY, Chang CW, Chu PF. Fine particulate speciation profile and emission factor of municipal solid waste incinerator

- established by dilution sampling method. *J Air Waste Manag Assoc.* agosto de 2016;66(8):807-14.
12. Ramadan BS, Rachman I, Matsumoto T. Activity and emission inventory of open waste burning at the household level in developing countries: a case study of Semarang City. *J Mater Cycles Waste Manag.* 2022;24(3):1194-204.
 13. Romero Y, Diaz C, Meldrum I, Arias Velasquez R, Noel J. Temporal and spatial analysis of traffic – Related pollutant under the influence of the seasonality and meteorological variables over an urban city in Peru. *Heliyon.* 1 de junio de 2020;6(6):e04029.
 14. Vu BN, Sánchez O, Bi J, Xiao Q, Hansel NN, Checkley W, et al. Developing an Advanced PM2.5 Exposure Model in Lima, Peru. *Remote Sens (Basel).* 2 de marzo de 2019;11(6):641.
 15. Kwon HS, Ryu MH, Carlsten C. Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Exp Mol Med.* marzo de 2020;52(3):318-28.
 16. Silva J, Rojas J, Norabuena M, Molina C, Toro RA, Leiva-Guzmán MA. Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Perú. *Environ Monit Assess.* diciembre de 2017;189(12):635.
 17. Thangavel P, Park D, Lee YC. Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *Int J Environ Res Public Health.* 19 de junio de 2022;19(12):7511.
 18. Sang S, Chu C, Zhang T, Chen H, Yang X. The global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2019. *Ecotoxicol Environ Saf.* 15 de junio de 2022;238:113588.
 19. Liu Y, Xie S, Yu Q, Huo X, Ming X, Wang J, et al. Short-term effects of ambient air pollution on pediatric outpatient visits for respiratory diseases in Yichang city, China. *Environ Pollut.* 1 de agosto de 2017;227:116-24.

20. Nhung NTT, Amini H, Schindler C, Kutlar Joss M, Dien TM, Probst-Hensch N, et al. Short-term association between ambient air pollution and pneumonia in children: A systematic review and meta-analysis of time-series and case-crossover studies. *Environ Pollut Barking Essex* 1987. noviembre de 2017;230:1000-8.
21. Zhou X, Guo M, Li Z, Yu X, Huang G, Li Z, Zhang X, Liu L. Associations between air pollutant and pneumonia and asthma requiring hospitalization among children aged under 5 years in Ningbo, 2015-2017. *Front Public Health*. 25 de enero de 2023. doi: 10.3389/fpubh.2022.1017105
22. Tapia V, Steenland K, Sarnat S, Vu B, Liu Y, Sánchez-Ccoyllo O, et al. Time-series analysis of ambient PM_{2.5} and cardiorespiratory emergency room visits in Lima, Peru during 2010-2016. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. julio de 2020;30(4):680-8.
23. Davila Cordova JE, Tapia Aguirre V, Vasquez Apestegui V, Ordoñez Ibarguen L, Vu BN, Steenland K, et al. Association of PM_{2.5} concentration with health center outpatient visits for respiratory diseases of children under 5 years old in Lima, Peru. *Environmental Health*. 15 de enero de 2020;19(1):7
24. Inhalable Particulate Matter and Health (PM_{2.5} and PM₁₀) | California Air Resources Board [Internet]. [citado 14 de junio de 2024]. Disponible en: <https://ww2.arb.ca.gov/es/resources/inhalable-particulate-matter-and-health>
25. Larson PS, Espira L, Glenn BE, Larson MC, Crowe CS, Jang S, et al. Long-Term PM_{2.5} Exposure Is Associated with Symptoms of Acute Respiratory Infections among Children under Five Years of Age in Kenya, 2014. *Int J Environ Res Public Health*. 22 de febrero de 2022;19(5):2525.
26. Explore the Data | State of Global Air [Internet]. [citado 31 de mayo de 2024]. Disponible en: [https://www.stateofglobalair.org/data/#/air/map?country=PER&pollutant=pm25&measure=death&deathMetric=number&geography=country®ion=country&subregions=Argentina,Bolivia%20\(Plurinational%20State%20of\),Chile,Ecuador,Paraguay,Uruguay&outcome=exposure®ionToggle=0&globals=false&hide](https://www.stateofglobalair.org/data/#/air/map?country=PER&pollutant=pm25&measure=death&deathMetric=number&geography=country®ion=country&subregions=Argentina,Bolivia%20(Plurinational%20State%20of),Chile,Ecuador,Paraguay,Uruguay&outcome=exposure®ionToggle=0&globals=false&hide)

Country=false

27. Datos Horarios de Contaminantes del Aire en Lima Metropolitana [Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - senamhi] | Plataforma Nacional de Datos Abiertos [Internet]. [citado 16 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/datos-horarios-de-contanimantes-del-aire-en-lima-metropolitana-servicio-nacional-de>
28. SENAMHI - Estaciones [Internet]. [citado 15 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>
29. Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres - SIGRID [Internet]. [citado 16 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/mapa?xmin=-81.32823049&ymin=-18.350927736&xmax=-68.652279103&ymax=-0.0386059690000025>
30. Tableau Software [Internet]. [citado 16 de marzo de 2024]. Poblacion estimada. Disponible en: https://public.tableau.com/views/Poblacionestimada/INICIO?:embed=y&:showVizHome=no&:host_url=https%3A%2F%2Fpublic.tableau.com%2F&:embed_code_version=3&:tabs=no&:toolbar=yes&:animate_transition=yes&:display_static_image=no&:display_spinner=no&:display_overlay=yes&:display_count=yes&:loadOrderID=0
31. Directorio de Grandes Empresas [Internet]. [citado 16 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://ogeiee.produce.gob.pe/index.php/en/estadisticas/nosotros-oei/historia-oei/item/625-productores-de-pisco-2015>
32. Generación anual de residuos sólidos municipales | Plataforma Nacional de Datos Abiertos [Internet]. [citado 4 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/generaci%C3%B3n-anual-de-residuos-s%C3%B3lidos-municipales-0>
33. Planes Maestros Optimizados (PMO) - Sunass [Internet]. 2020 [citado 4 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.sunass.gob.pe/nuestras-funciones/regular/planes-maestros-optimizados-pmo/>

34. Decreto Supremo que aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire | SINIA [Internet]. [citado 14 de junio de 2024]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-que-aprueba-protocolo-nacional-monitoreo-calidad>
35. Zhang D, Li Y, Chen Q, Jiang Y, Chu C, Ding Y, et al. The relationship between air quality and respiratory pathogens among children in Suzhou City. *Ital J Pediatr.* 23 de septiembre de 2019;45:123.
36. Zhang X, Liu H, Tang H, Zhang M, Yuan X, Shen X. The effect of population size for pathogen transmission on prediction of COVID-19 spread. *Sci Rep.* 9 de septiembre de 2021;11(1):1-12.
37. Organization WH. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [Internet]. World Health Organization; 2021 [citado 14 de junio de 2024]. Disponible en: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
38. Ministerio del Ambiente [Internet]. [citado 14 de junio de 2024]. Ministerio del Ambiente identifica 92 distritos que requieren tomar acciones para mejorar el manejo de residuos sólidos. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/ministerio-del-ambiente-identifica-92-distritos-en-situacion-de-riesgo-por-manejo-de-residuos-solidos/>
39. Adultos mayores y menores de 5 años pueden vacunarse gratis contra influenza y neumonía en el Parque de la Exposición [Internet]. DIRIS LIMA CENTRO. 2019 [citado 14 de junio de 2024]. Disponible en: <https://dirislimacentro.gob.pe/que-gane-tu-salud/>
40. Reyna G, Ingrid SB. Conocimientos y actitudes sobre las medidas de prevención de las infecciones respiratorias agudas en madres menores de 5 años del C.S “Marical Castilla”-Rímac 2017. Repositorio Institucional - Universidad Norbert Wiener . 2017 [citado 14 junio 2024]; Disponible en: <https://repositorio.uwiener.edu.pe/handle/20.500.13053/2573>

41. Quispe Quispe MR. Conocimiento sobre medidas de prevención de infecciones respiratorias agudas en madres de niños menores de 5 años, mercado Los Incas, Independencia, 2020. Repositorio Institucional - Universidad Cesar Vallejo [Internet]. 2020 [citado 14 de junio de 2024]; Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/74066>
42. MTC: El 58% de la contaminación del aire en Lima y Callao es provocado por el Parque Automotor [Internet]. [citado 14 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/819851-mtc-el-58-de-la-contaminacion-del-aire-en-lima-y-callao-es-provocado-por-el-parque-automotor>
43. Shi W, Liu C, Annesi-Maesano I, Norback D, Deng Q, Huang C, et al. Ambient PM_{2.5} and its chemical constituents on lifetime-ever pneumonia in Chinese children: A multi-center study. *Environment International*. 1 de enero de 2021;146:106176.
44. Balasubramani K, Prasad KA, Kodali NK, Abdul Rasheed NK, Chellappan S, Sarma DK, et al. Spatial epidemiology of acute respiratory infections in children under 5 years and associated risk factors in India: District-level analysis of health, household, and environmental datasets. *Front Public Health* [Internet]. 13 de diciembre de 2022 [citado 14 de junio de 2024];10. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/public-health/articles/10.3389/fpubh.2022.906248/full>
45. UNICEF DATA [Internet]. [citado 14 de junio de 2024]. Pneumonia in Children Statistics. Disponible en: <https://data.unicef.org/topic/child-health/pneumonia/>
46. Rogan M. Respiratory Infections, Acute. *International Encyclopedia of Public Health*. 2017;332.
47. Darrow LA, Klein M, Flanders WD, Mulholland JA, Tolbert PE, Strickland MJ. Air Pollution and Acute Respiratory Infections Among Children 0–4 Years of Age: An 18-Year Time-Series Study. *American Journal of Epidemiology*. 15 de noviembre de 2014;180(10):968-77.

48. Ordoñez-Aquino C, Ordoñez ibargüen LA. Enfermedades respiratorias y calidad del aire en Lima Sur, Perú (2018 – 2019). *Boletín Epidemiológico del Perú*. 2023; 32 (42): 1204-1209.
49. Liu X, Zhao X, Li X, Lv S, Ma R, Qi Y, et al. PM2.5 triggered apoptosis in lung epithelial cells through the mitochondrial apoptotic way mediated by a ROS-DRP1-mitochondrial fission axis. *Journal of Hazardous Materials*. 5 de octubre de 2020;397:122608.
50. Yang L, Li C, Tang X. The Impact of PM2.5 on the Host Defense of Respiratory System. *Frontiers in Cell and Developmental Biology* [Internet]. 2020 [citado 22 de marzo de 2023];8. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fcell.2020.00091>
51. Montgomery MT, Sajuthi SP, Cho SH, Everman JL, Rios CL, Goldfarbmuren KC, et al. Genome-Wide Analysis Reveals Mucociliary Remodeling of the Nasal Airway Epithelium Induced by Urban PM2.5. *Am J Respir Cell Mol Biol*. agosto de 2020;63(2):172-84.
52. Chen YW, Li SW, Lin CD, Huang MZ, Lin HJ, Chin CY, et al. Fine Particulate Matter Exposure Alters Pulmonary Microbiota Composition and Aggravates Pneumococcus-Induced Lung Pathogenesis. *Front Cell Dev Biol* [Internet]. 26 de octubre de 2020 [citado 14 de junio de 2024];8. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fcell.2020.570484>
53. Domenici R, Vierucci F. Exclusive Breastfeeding and Vitamin D Supplementation: A Positive Synergistic Effect on Prevention of Childhood Infections? *International Journal of Environmental Research and Public Health*. enero de 2022;19(5):2973.
54. Li D, Wang JB, Zhang ZY, Shen P, Zheng PW, Jin MJ, et al. Effects of air pollution on hospital visits for pneumonia in children: a two-year analysis from China. *Environ Sci Pollut Res Int*. abril de 2018;25(10):10049-57.
55. Ordoñez L. Situación epidemiológica de las infecciones respiratorias agudas (IRA) en el Perú. *Boletín Epidemiológico del Perú*. 2018; 27 (43): 1005-1008

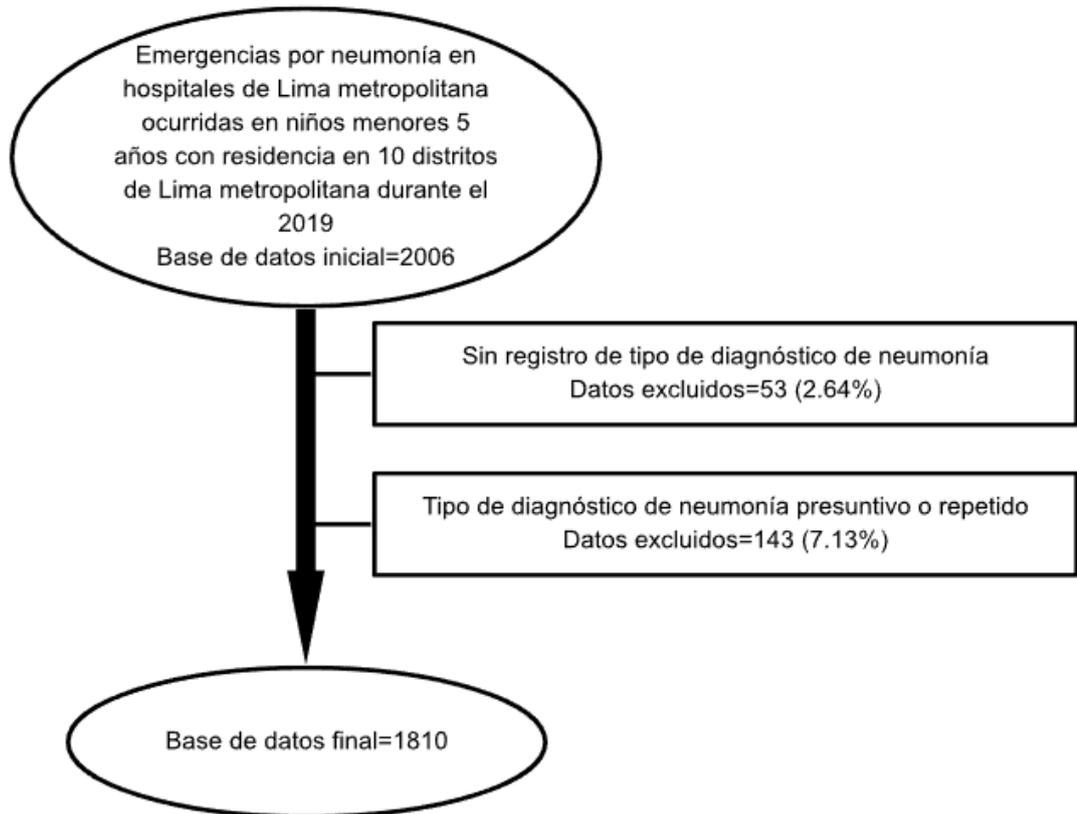
56. Ministerio del Ambiente [Internet]. [citado 1 de mayo de 2024]. Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM.-. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2017-minam/>
57. Cao C, Jiang W, Wang B, Fang J, Lang J, Tian G, Jiang J, Zhu T. Inhalable Microorganisms in Beijing's PM2.5 and PM10 Pollutants during a Severe Smog Event. *Environ. Sci. Technol.* 2014; 48 (39): 1499–1507
58. He Y, Liu WJ, Jia N, Richardson S, Huang C. Viral respiratory infections in a rapidly changing climate: the need to prepare for the next pandemic. *EBioMedicine.* julio de 2023;93:104593.
59. Wei Y, Dong Z, Fan W, Xu K, Tang S, Wang Y, et al. A narrative review on the role of temperature and humidity in COVID-19: Transmission, persistence, and epidemiological evidence. *Eco-Environment & Health.* 1 de junio de 2022;1(2):73-85.
60. Huang D, Taha MS, Nocera AL, Workman AD, Amiji MM, Bleier BS. Cold exposure impairs extracellular vesicle swarm-mediated nasal antiviral immunity. *J Allergy Clin Immunol.* febrero de 2023;151(2):509-525.e8.

12. ANEXOS

12.1. ANEXO 1: Ubicación de los monitores de SENAMHI

Nombre de la estación	Ubicación
Estación Puente Piedra	Complejo Municipal Gallo de Oro, Av. Juan Lecaros 426B, Puente Piedra 15121
Estación Carabaylo	Piscina Municipal de Carabaylo, Pje Los Alamos s/n, Urb. Santa Isabel, Carabaylo
Estación San Martín de Porres	Parque Ecológico de San Martín de Porres, Av. Angélica Gamarra 2369, San Martín de Porres 15108
Estación San Juan de Lurigancho	Universidad Cesar Vallejo sede, Av. Del Parque cdra. 6, Urb. Canto Rey, San Juan de Lurigancho
Estación Santa Anita	Palacio Municipal de Santa Anita, Av. Los Eucaliptos Cdra. 12, Santa Anita
Estación Ate	Parque frente al Municipalidad de Ate, Av. Ctra. Central 7, Ate 15008
Estación Huachipa	Av. Los Canarios Mz. O2 Lt. 5, Urb. El Club, Lurigancho, 15009
Estación Villa María del Triunfo	Parque Nueva Esperanza, Av. 26 de noviembre, Villa María del Triunfo.
Estación San Borja	Polideportivo Limatambo, Av. Malachowsky 560, San Borja 15036
Estación Campo de marte	Campo de Marte, Jr. Nazca s/n, Jesús María

12.2. ANEXO 2: Datos excluidos según los criterios de exclusión



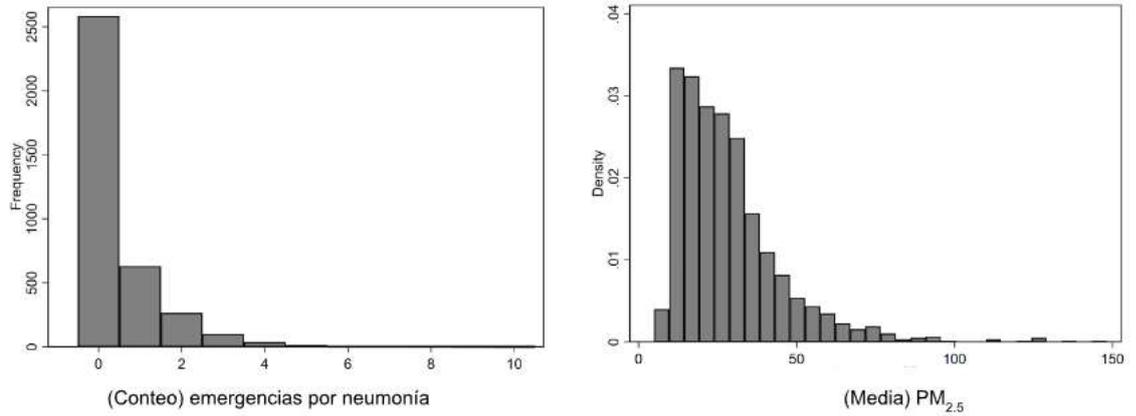
12.3. ANEXO 3: Criterio de equi-dispersión

. sum emerg_neumo_men5,d

(count) emerg_neumo_men5

Percentiles		Smallest	Varianza es mayor que la media (0.997 > 0.498)	
1%	0	0	Obs	3,650
5%	0	0	Sum of wgt.	3,650
10%	0	0		
25%	0	0		
50%	0		Mean	.4958904
		Largest	Std. dev.	.9933236
75%	1	8	Variance	.9866918
90%	2	8	Skewness	3.078556
95%	2	9	Kurtosis	16.80639
99%	4	10		

12.4. ANEXO 4: Distribución de las emergencias según el hospital de atención



12.5. ANEXO 5: Distribución de las emergencias según el hospital de atención

Datos del Hospital de atención				Freq	%
Renipress	Distrito	Nivel	Nombre		
5966	Ate	I-4	San Fernando	1	0.06
5883	Ate	II-1	Hospital de Huaycan	27	1.49
5945	Ate	II-1	Hospital Vitarte	26	1.44
6216	Breña	III-2	Instituto Nacional de Salud del Niño	502	27.73
7634	Comas	III-1	Hospital Sergio E. Bernales	57	3.15
5946	El Agustino	III-1	Hospital Nacional Hipolito Unanue	18	0.99
6212	La Victoria	III-E	Hospital de Emergencias Pediátricas	123	6.80
6215	Lima	III-E	Hospital Nacional Docente Madre Niño San Bartolome	110	6.08
6208	Lima	III-2	Instituto Nacional Materno Perinatal	4	0.22
5947	Lurigancho	II-2	Hospital de Mediana Complejidad Jose Agurto Tello	73	4.03
6213	Miraflores	III-E	Hospital de Emergencias José Casimiro Ulloa	7	0.39
6211	Pueblo Libre	III-1	Hospital de apoyo Santa Rosa	19	1.05
7632	Puente Piedra	II-2	Hospital Carlos Lanfranco La Hoz	116	6.41
7633	San Martín de Porres	III-1	Hospital Nacional Cayetano Heredia	373	20.61
6750	Santa Anita	I-4	Santa Anita	3	0.17
5987	San Juan de Lurigancho	III-1	Hospital María Auxiliadora	7	0.39
5617	San Juan de Lurigancho	II-2	Hospital San Juan de Lurigancho	328	18.12
23159	Villa El Salvador	II-2	Hospital de Emergencias Villa El Salvador	16	0.88
Total				1810	100