



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

MORBILIDAD POR ENFERMEDAD
RESPIRATORIA Y CALIDAD DE AIRE
AMBIENTAL EN LIMA
METROPOLITANA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
MEDICINA OCUPACIONAL Y DEL MEDIO
AMBIENTE

DIEGO DANILO GAYOSO LIVIAC

LIMA – PERÚ

2026

ASESOR

MG. JONH MAXIMILIANO ASTETE CORNEJO

JURADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

MG. MAEG ALBERTO ARRIOLA ESCALANTE

PRESIDENTE

MG. RAUL ASTETE CORNEJO

VOCAL

MG. RAUL JESUS GOMERO CUADRA

SECRETARIO (A)

DEDICATORIA.

A mi hijo, Luca Ray, por ser mi motor diario y la razón de cada esfuerzo.

A mi familia, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi camino profesional.

AGRADECIMIENTOS.

Y a mis maestros y colegas, por guiarme en el arte de cuidar la salud de quienes trabajan por el desarrollo de nuestra sociedad.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

Trabajo de investigación Autofinanciado



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	GAYOSO LIVIAC DIEGO DANILO

Pertenecientes al programa de la **MAESTRÍA EN MEDICINA OCUPACIONAL Y DEL MEDIO AMBIENTE**, autores del trabajo titulado: **MORBILIDAD POR ENFERMEDAD RESPIRATORIA Y CALIDAD DE AIRE AMBIENTAL EN LIMA METROPOLITANA**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el grado de **MAESTRO EN MEDICINA OCUPACIONAL Y DEL MEDIO AMBIENTE** bajo la modalidad de **TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASesorÍA
1.	ASTETE CORNEJO JONH MAXIMILIANO	FAMED	ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **11%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3032785457**; fecha de entrega: **15-09-2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 15 de septiembre de 2026**


Firma del asesor
Nº DNI: 23991826
ORCID: 0000-0001-6225-6720

Firma del Co-asesor
Nº DNI:
ORCID:

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Planteamiento del Problema.....	1
1.2.	Justificación.....	3
1.3.	Objetivos	4
1.4.	Estrategia Metodológica.....	5
1.5.	Gestión de la Calidad Documentaria.....	7
II.	DESARROLLO DE LOS TRABAJOS	9
2.1.	Contaminación del aire ambiental, material particulado y efectos respiratorios.....	9
2.1.1.	Antecedentes y marco teórico	9
2.1.2.	Material particulado	13
2.1.3.	Mecanismos fisiopatológicos	16
2.1.4.	Efectos Respiratorios Específicos	19
2.1.5.	Análisis crítico	24
2.2.	Marco normativo y antecedentes nacionales sobre calidad de aire y enfermedades respiratorias en el Perú.....	28
2.2.1.	Antecedentes del Marco Normativo Ambiental en el Perú.....	28
2.2.2.	Normativa Peruana Vigente sobre Calidad de Aire	31

2.2.3.	Políticas y Planes de Acción	35
2.2.4.	Sistemas de Información y Vigilancia	37
2.2.5.	Análisis Comparativo: ECA Peruanos vs. Directrices Internacionales	40
2.2.6.	Antecedentes de Estudios Nacionales en Otras Regiones.....	43
2.2.7.	Análisis crítico	45
2.3.	Morbilidad por enfermedad respiratoria y calidad de aire en Lima Metropolitana	50
2.3.1.	Antecedentes y Contexto de Lima Metropolitana.....	51
2.3.2.	Estado de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana.....	53
2.3.3.	Estudios Epidemiológicos en Lima Metropolitana	59
2.3.4.	Tesis e Investigaciones Locales	64
2.3.5.	Carga de Enfermedad Respiratoria en Lima	68
2.3.6.	Análisis Crítico	73
III.	CONCLUSIONES	75
IV.	RECOMENDACIONES	78
V.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

RESUMEN

La contaminación del aire ambiental representa el principal riesgo ambiental para la salud pública global, con particular incidencia en ciudades como Lima Metropolitana, donde las concentraciones de material particulado superan de manera sistemática las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS). El presente trabajo sintetiza y analiza críticamente la evidencia documentaria sobre la relación entre la contaminación del aire ambiental y la morbilidad por enfermedad respiratoria en Lima Metropolitana, mediante una revisión organizada en tres portafolios de conocimientos: evidencia científica internacional sobre material particulado y sus efectos respiratorios, marco normativo peruano y comparativa con estándares internacionales, y estudios epidemiológicos locales sobre calidad de aire y morbilidad respiratoria en la ciudad. La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos indexadas, complementada con fuentes normativas oficiales, bajo criterios de inclusión cronológicos y herramientas de evaluación de calidad metodológica. Los hallazgos permiten identificar tres problemas concretos: los Estándares de Calidad Ambiental peruanos para $PM_{2.5}$ anual son cinco veces más permisivos que las directrices OMS 2021; la red de monitoreo REMCA-SENAMHI resulta insuficiente en densidad y transparencia para una metrópolis que supera los 11 millones de habitantes; y los estudios epidemiológicos locales documentan incrementos significativos de mortalidad cardiorrespiratoria, hospitalizaciones por asma y consultas pediátricas por neumonía asociados a la exposición a $PM_{2.5}$.

Palabras clave: Contaminación del Aire; Material Particulado; Enfermedades Respiratorias

ABSTRACT

Ambient air pollution constitutes the leading environmental risk to global public health, with particular relevance in cities such as Lima, where particulate matter concentrations systematically exceed the guidelines of the World Health Organization. The present work aims to synthesize and critically analyze the documentary evidence on the relationship between ambient air pollution and respiratory disease morbidity in Metropolitan Lima, through a documentary review organized into three knowledge portfolios: (i) international scientific evidence on particulate matter and its respiratory effects; (ii) the Peruvian regulatory framework and its comparison with international standards; and (iii) local epidemiological studies on air quality and respiratory morbidity in the city. The bibliographic search was conducted across indexed databases, complemented by official normative sources, applying chronological inclusion criteria and quality assessment tools. The findings reveal that Peru's Environmental Quality Standards for annual PM_{2.5} are five times more permissive than the WHO 2021 guidelines, that the REMCA-SENAMHI monitoring network is insufficient in density and methodological transparency for a metropolis of over 11 million inhabitants, and that local epidemiological studies document significant increases in cardiorespiratory mortality, asthma hospitalizations, and pediatric pneumonia consultations associated with short-term exposure to PM_{2.5}.

Keywords: Air Pollution; Particulate Matter; Respiratory Tract Diseases

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

La contaminación del aire ambiental constituye el factor de riesgo ambiental más influyente sobre la salud pública global. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), casi el 100% de la población mundial reside en zonas donde los niveles de contaminación del aire exceden los valores guía recomendados (1). En el año 2021, la exposición al material particulado fino ($PM_{2.5}$) causó aproximadamente 7 830 000 muertes y 231 510 000 años de vida ajustados por discapacidad (DALYs) en todo el mundo (2).

Los contaminantes atmosféricos más relevantes para la salud incluyen el material particulado (tanto PM_{10} como $PM_{2.5}$), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el ozono troposférico (O_3) y el monóxido de carbono (CO). La evidencia científica ha demostrado consistentemente que la exposición a estos contaminantes atmosféricos se asocia con un amplio espectro de enfermedades respiratorias, desde infecciones respiratorias agudas y crisis asmáticas, hasta enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y cáncer pulmonar (3–7).

En el contexto peruano, en Lima Metropolitana reside aproximadamente el treinta y tres por ciento de la población nacional y ha sido designada como Zona de Atención Prioritaria (ZAP) desde el año 2001 debido a sus elevados índices de contaminación atmosférica. Los estudios realizados en la ciudad reportan concentraciones promedio anuales de $PM_{2.5}$ que oscilan entre 21 y 27 $\mu g/m^3$, valores que superan ampliamente tanto el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) nacional de 25 $\mu g/m^3$ como las directrices de la OMS de 2021 (5 $\mu g/m^3$ anual) (8,9).

Según el Air Quality Life Index, los 000residentes de Lima pierden un promedio de 1,88 años de esperanza de vida debido a la contaminación del aire por PM_{2.5} (10).

A pesar de los esfuerzos normativos implementados en las últimas dos décadas, incluyendo la aprobación de Estándares de Calidad Ambiental para Aire (11), el Protocolo Nacional de Monitoreo (12), el establecimiento del INCA (13), el Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en Lima-Callao 2021-2025 (14) y otra normativa de relacionada (15–17), los niveles de contaminación en Lima siguen siendo preocupantes. Adicionalmente, los ECA peruanos para PM_{2.5} anual (25 µg/m³) resultan cinco veces más permisivos que las directrices actualizadas de la OMS (5 µg/m³), poniendo en evidencia una brecha importante entre la normativa nacional y la evidencia científica más reciente.

Los estudios epidemiológicos realizados en Lima Metropolitana han documentado asociaciones significativas entre la exposición a corto plazo al PM_{2.5} y el incremento de visitas a emergencias por causas respiratorias (+3,7% por IQR de PM_{2.5}), mortalidad cardiorrespiratoria (RR=1,029 por 10 µg/m³ de PM_{2.5}), consultas pediátricas por neumonía (+16-19%) y visitas a emergencias por asma (+3,7%) (8,9,18–21). No obstante, estos estudios se han enfocado predominantemente en el periodo 2010-2016 y en la exposición a PM_{2.5}, existiendo un vacío de conocimiento integrador que relacione la totalidad de la evidencia disponible con la situación específica de Lima Metropolitana.

Por lo expuesto, una revisión documentaria resulta necesaria para sintetizar de forma crítica e integradora la evidencia científica sobre los efectos de la

contaminación del aire en la salud respiratoria, contrastarla con el marco normativo vigente peruano y analizar los estudios locales disponibles para Lima Metropolitana. Dicha revisión permitirá identificar las brechas entre lo que establece la evidencia científica y lo que ha incorporado la normativa nacional, con miras a generar recomendaciones basadas en evidencia para el fortalecimiento de las políticas de protección de la salud respiratoria en la ciudad.

1.2. Justificación

La contaminación del aire ambiental se encuentra entre los primeros diez lugares de los factores de riesgo con mayor impacto en la reducción de años de vida ajustados por discapacidad (DALY) a nivel global. Comprender los mecanismos fisiopatológicos por los cuales los contaminantes atmosféricos producen daño respiratorio resulta indispensable para fundamentar las intervenciones preventivas y las políticas de salud pública. La presente revisión integra la evidencia más reciente sobre dichos mecanismos con la realidad normativa y epidemiológica del Perú, contribuyendo al conocimiento en el ámbito de la medicina ocupacional y ambiental.

Asimismo, los hallazgos de esta revisión permitirán contrastar críticamente la normativa peruana vigente sobre calidad de aire con las directrices internacionales más actualizadas y con la evidencia epidemiológica local. De este modo, se generarán insumos concretos para la planificación de programas de gestión de calidad de aire, la actualización de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) nacionales y el diseño de estrategias de salud pública orientadas a reducir el impacto de la contaminación sobre las enfermedades respiratorias en Lima Metropolitana.

La población de Lima Metropolitana tiene un interés directo en conocer la relación entre la calidad del aire que respira y su salud respiratoria. La síntesis propuesta generará recomendaciones con potencial beneficio para más de 10 millones de habitantes, contribuyendo al desarrollo de políticas públicas basadas en evidencia que protejan a los grupos más vulnerables, como las personas con enfermedades respiratorias crónicas preexistentes, los niños menores de cinco años y los adultos mayores.

1.3. Objetivos

Objetivo General:

Sintetizar y analizar críticamente la evidencia documentaria sobre la relación entre la contaminación del aire ambiental y la morbilidad por enfermedad respiratoria en Lima Metropolitana, a través de una revisión documentaria que integre la literatura científica internacional, la normativa nacional y los estudios epidemiológicos locales.

Objetivos Específicos:

- Sintetizar la evidencia científica internacional sobre la composición, mecanismos fisiopatológicos y efectos respiratorios del material particulado y otros contaminantes del aire ambiental.
- Analizar y contrastar la normativa peruana vigente sobre calidad de aire ambiental frente a las directrices internacionales (OMS 2021, EPA 2024, UE) y la evidencia científica actualizada.

- Revisar y sistematizar los estudios epidemiológicos locales sobre morbilidad por enfermedad respiratoria y calidad de aire en Lima Metropolitana.
- Proponer recomendaciones basadas en la evidencia documentaria para la mejora de las políticas orientadas a la protección de la salud respiratoria en Lima Metropolitana.

1.4. Estrategia Metodológica

- **Fuentes de Información:**
 - **Bases de Datos Científicas:** PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, SciELO, LILACS.
 - **Repositorios Normativos:** Diario Oficial El Peruano, Plataforma Digital del Estado Peruano, SINIA, SENAMHI, OMS, OIT, ACGIH, NIOSH, IARC, entre otros.
 - **Documentación Gris:** Repositorio Nacional de Trabajos de Investigación – RENATI; repositorios institucionales de universidades peruanas (UPCH, UNMSM, UNFV, UCV, entre otros); informes técnicos del MINAM, SENAMHI, DIGESA, OEFA, INS, CDC Perú; boletines epidemiológicos del Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (CDC Perú); informes del Air Quality Life Index (AQLI) de la Universidad de Chicago.
- **Criterios de Inclusión y Exclusión:**
 - **Inclusión:**

- Documentos publicados entre 2015 y 2026 (últimos 10 años), con excepción de documentos normativos vigentes y estudios de referencia de relevancia histórica.
 - Idiomas: español e inglés.
 - Tipos de documentos: artículos originales, revisiones sistemáticas, meta-análisis, guías de práctica clínica, documentos normativos (decretos supremos, resoluciones ministeriales, protocolos), informes técnicos institucionales, tesis de posgrado de universidades.
 - Temática: contaminación del aire ambiental, material particulado, contaminantes atmosféricos, enfermedades respiratorias, calidad de aire, normativa ambiental peruana, estudios epidemiológicos en Lima Metropolitana.
 - Documentos con respaldo institucional verificable.
- **Exclusión:**
- Documentos publicados antes de 2015, excepto normativa vigente y estudios de referencia de relevancia histórica.
 - Guías de práctica clínica no vigentes o reemplazadas por versiones más recientes.
 - Documentos sin respaldo institucional o de fuentes no verificables.
 - Estudios enfocados exclusivamente en contaminación de aire intradomiciliario sin relación con aire ambiental.

- Estudios enfocados exclusivamente en exposiciones laborales sin componente ambiental.
- Proyectos de investigación no ejecutados o no publicados.
- Artículos de opinión, editoriales o cartas al editor sin datos originales.

1.5. Gestión de la Calidad Documentaria

Para garantizar la calidad y rigor de los documentos revisados, se emplearon las siguientes herramientas de evaluación:

- **AGREE II:** Para la evaluación de guías de práctica clínica y guías internacionales que se incluyen en la revisión.
- **CASPe:** Para la lectura crítica y evaluación de la calidad de artículos científicos (estudios observacionales, revisiones sistemáticas, meta-análisis).
- **Prueba de Autenticidad y Vigencia:** Para la evaluación de documentos legales y normativos peruanos. Se verificará:
 - Autenticidad: publicación oficial en El Peruano o plataformas oficiales del Estado (gob.pe, SINIA).
 - Vigencia: que no haya sido derogado, modificado o reemplazado por norma posterior.
 - Concordancia: coherencia con el marco legal superior.

- **NOS (Newcastle-Ottawa Scale):** Para evaluar la calidad de estudios observacionales (cohortes, casos y controles, ecológicos) incluidos en la revisión.

II. DESARROLLO DE LOS TRABAJOS

2.1. Contaminación del aire ambiental, material particulado y efectos respiratorios

2.1.1. Antecedentes y marco teórico

La contaminación del aire ambiental (CAA) se define, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), como la presencia en el aire exterior de sustancias físicas, químicas o biológicas que alteran las características de la atmósfera, representando un riesgo para la salud humana, la fauna, la flora y los ecosistemas (1). Esta definición comprende tanto los contaminantes primarios, emitidos directamente desde fuentes identificables, como los secundarios, que se forman por reacciones fotoquímicas y fisicoquímicas entre precursores atmosféricos. A diferencia de otros determinantes ambientales de la salud, la CAA se caracteriza por una exposición universal e involuntaria, no existe una "dosis cero" a la que la población pueda optar, lo que la convierte en uno de los mayores riesgos ambientales para la salud pública a nivel global, con efectos que se extienden desde las vías respiratorias hasta los sistemas cardiovascular, neurológico y reproductivo (1).

La carga epidemiológica de la CAA es considerable: en 2021, la exposición a PM_{2.5} fue responsable de 7 830 000 muertes prematuras y 231 510 000 años de vida ajustados por discapacidad (DALYs) a nivel mundial, según el GBD 2021 (2). Lo que estos números no capturan de inmediato es su distribución desigual, las proyecciones mediante modelos bayesianos edad-período-cohorte (BAPC) indican que, aunque las tasas estandarizadas por edad muestran una tendencia decreciente

en regiones de altos ingresos, la carga absoluta continúa aumentando por el crecimiento demográfico y la urbanización acelerada en países de ingresos bajos y medianos (2). Esta paradoja adquiere especial relevancia en ciudades como Lima, donde la alta densidad de fuentes emisoras coexiste con un sistema de vigilancia epidemiológica aún insuficiente para cuantificar con precisión la carga atribuible local.

Las fuentes de CAA se clasifican según su origen en antropogénicas y naturales. Las primeras vienen del transporte motorizado (emisiones de escape y partículas de frenos, neumáticos y pavimento), la combustión industrial en plantas energéticas, refinerías, establecimientos manufactureros, la agricultura mediante quema de rastrojos y ganadería intensiva, el sector residencial con quema de biomasa, y las actividades de construcción y demolición (22). Las segundas incluyen incendios forestales, polvo mineral procedente de desiertos, erupciones volcánicas, aerosoles marinos y emanaciones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles (COV) de la vegetación (22). La distinción entre ambas categorías tiene importancia para el diseño regulatorio, aunque sus interacciones, como la deposición de nitrógeno antropogénico que altera las emisiones biogénicas, añaden complejidad al panorama. Cabe señalar que el cambio climático agrava la calidad del aire en ambas direcciones: temperaturas más altas favorecen la formación de ozono troposférico, mientras que la mayor frecuencia de sequías incrementa los incendios forestales (22).

Los principales contaminantes del aire ambiental se presentan en la Tabla 1, con sus fuentes y efectos sobre la salud respiratoria.

Tabla 1. Principales contaminantes del aire ambiental: fuentes y efectos en salud respiratoria

Contaminante	Símbolo	Fuentes principales	Efectos primarios en salud respiratoria
Material particulado fino	PM _{2.5}	Combustión (vehículos, industria, biomasa), procesos secundarios atmosféricos	Inflamación pulmonar, asma, EPOC, cáncer de pulmón
Material particulado grueso	PM ₁₀	Polvo vial, construcción, minería, viento	Irritación de vías respiratorias superiores, bronquitis
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	Tráfico motorizado, industria, combustión	Inflamación bronquial, hiperreactividad, exacerbación de asma
Dióxido de azufre	SO ₂	Combustión de carbón y petróleo, fundiciones	Broncoespasmo, exacerbación de EPOC, síntomas asmáticos
Monóxido de carbono	CO	Combustión incompleta de motores, calefacción	Hipoxia tisular, agravamiento de enfermedades cardiorrespiratorias
Ozono troposférico	O ₃	Reacción fotoquímica entre NO _x y COV bajo luz solar	Daño epitelial, hiperreactividad bronquial, exacerbación de asma y EPOC

Fuente: Elaboración propia basada en OMS (2021) (1) y Liu et al. (2024) (23).

Un aspecto menos abordado en la normativa vigente es la contaminación compuesta PM_{2.5}–O₃. Un análisis espacio-temporal en 120 ciudades documentó patrones de ocurrencia simultánea con consecuencias aditivas e incluso multiplicativas sobre la salud respiratoria (24). Los marcos regulatorios actuales establecen estándares individuales para cada contaminante, sin considerar sus efectos combinados, lo que representa una brecha en la defensa de la salud pública.

En septiembre de 2021, la OMS publicó una actualización a las guías de calidad del aire (Air Quality Guidelines, AQG), más estrictas que las de 2005, en respuesta a

la acumulación de evidencia de efectos adversos a concentraciones previamente consideradas aceptables (1). La Tabla 2 presenta la comparación de los valores guía para los principales contaminantes.

Tabla 2. Comparación de Directrices de Calidad del Aire OMS 2005 vs. OMS 2021

Contaminante	Periodo de promedio	AQG OMS 2005 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	AQG OMS 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cambio (%)
PM _{2.5}	Anual	10	5	−50%
PM _{2.5}	24 horas	25	15	−40%
PM ₁₀	Anual	20	15	−25%
PM ₁₀	24 horas	50	45	−10%
NO ₂	Anual	40	10	−75%
NO ₂	24 horas	-	25	Nuevo
O ₃ (pico de temporada)	Media 8 horas	100	60	−40%
CO	24 horas	-	4 mg/m ³	Nuevo

Fuente: Elaboración propia basada en OMS (2021) (1).

La reducción del 50% en el valor guía anual para PM_{2.5}, de 10 a 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se sustenta en metaanálisis comisionados por la propia OMS que documentaron efectos adversos a concentraciones bajas (7). Un análisis satelital en el período 2017-2022 determinó que el 96% de la superficie global supera los nuevos valores guía de la OMS 2021 (25). En el contexto peruano, Lima y Arequipa presentan concentraciones anuales de PM_{2.5} que superan ampliamente esos estándares, lo cual

exige una revisión de las políticas nacionales de control de emisiones a la luz de estas nuevas referencias.

El análisis del Global Burden of Disease (GBD) 2021 abarca 204 países y proyecta la mortalidad y los años de vida ajustados por discapacidad atribuibles a PM_{2.5} hasta el año 2036 (2). Los datos revelan que a pesar de que las tasas estandarizadas por edad disminuyen en regiones de altos ingresos, reflejo de mejoras tecnológicas y regulatorias, la carga absoluta aumenta en el sur y sureste de Asia y en África subsahariana (2). A nivel de ciudades globales, la distribución de la mortalidad atribuible es heterogénea, siendo que el sudeste asiático concentra la mayor proporción(26), lo que plantea la necesidad de estrategias diferenciadas por región y de mayor inversión en redes de monitoreo en países de bajos y medianos ingresos (27).

2.1.2. Material particulado

El material particulado comprende una mezcla de partículas suspendidas en el aire, tanto sólidas y líquidas, cuyo comportamiento en el sistema respiratorio depende de su diámetro aerodinámico. La clasificación convencional distingue cuatro fracciones, presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del material particulado por diámetro aerodinámico y patrones de deposición respiratoria

Fracción	Diámetro aerodinámico (µm)	Denominación	Zonas de depósito en el árbol respiratorio	Relevancia clínica
----------	----------------------------	--------------	--	--------------------

PM ₁₀	≤ 10	Inhalable Grueso	/ Nasofaringe, tráquea, bronquios principales	Irritación de vías superiores, bronquitis
PM _{2.5}	≤ 2,5	Fino Respirable	/ Bronquiolos terminales, alvéolos pulmonares	Inflamación sistémica, asma, EPOC, cáncer
PM ₁	≤ 1	Subfino	Alvéolos, posible paso a circulación sistémica	Efectos cardiovasculares y sistémicos
UFP (PM _{0.1})	< 0,1	Ultrafino	Alvéolos, membrana alvéolo-capilar, sangre, órganos extrapulmonares	Daño sistémico multiorgánico, neurológico

Fuente: Elaboración propia basada en Thangavel et al. (2022) (3), Lim y Kim

(2024) (5) y Kodros et al. (2018) (28).

Las partículas menores de 5 µm penetran hasta los alvéolos pulmonares; las ultrafinas (UFP, < 0,1 µm) pueden atravesar la membrana alvéolo-capilar y alcanzar la circulación sistémica, depositándose en órganos extrapulmonares (3). Evidencia experimental mediante imágenes de fluorescencia confirmó la deposición dinámica de PM_{2.5} en alvéolos y su translocación a hígado, corazón y cerebro (29). La distribución de tamaños dentro de la fracción PM_{2.5} genera variabilidad regional en los patrones de deposición respiratoria: usar únicamente la masa total de PM_{2.5} como indicador de exposición subestima la heterogeneidad toxicológica real (28). A esto se suma el efecto del cambio climático, que modifica las propiedades fisicoquímicas del PM, como tamaño, solubilidad, composición, y, en consecuencia, su toxicidad (30).

El PM_{2.5} no es una sustancia homogénea, sino una mezcla cuya toxicidad depende de su composición, y que varía según la fuente de emisión, la geografía y las condiciones meteorológicas.

La fracción inorgánica comprende sulfatos (SO₄), nitratos (NO₃) y amonio (NH₄), formados por reacciones secundarias en la atmósfera, y metales traza como plomo, arsénico, cadmio, níquel, hierro, zinc y manganeso. Un estudio de cohorte de 22 años en el norte de China identificó al sulfato como el componente inorgánico con mayor asociación a mortalidad cardiopulmonar, con efecto dosis-respuesta independiente del tabaquismo (31).

La fracción orgánica incluye carbono orgánico (OC), carbono negro (BC o EC, indicador de combustión incompleta), hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP/PAH) y nitroaromáticos. Los metales y los PAH actúan como catalizadores de reacciones redox que generan especies reactivas de oxígeno (ROS), con toxicidad dependiente de la función mitocondrial y la activación del factor de transcripción Nrf2 (32). Esto explica por qué partículas de emisiones diésel, ricas en BC y PAH, tienen mayor toxicidad por unidad de masa que partículas de origen no combustible.

La fracción biológica, endotoxinas bacterianas, glucanos fúngicos, esporas y bioaerosoles, es especialmente relevante en entornos agrícolas y zonas con quema de biomasa doméstica (33). La revisión de Li et al. (2022) estableció que la inflamación y el estrés oxidativo son el mecanismo central de toxicidad tanto del PM como de sus componentes individuales, con evidencia epidemiológica y experimental convergente (6).

El análisis mediante factorización de matriz positiva (PMF) por Zhang et al. (2022) ha identificado las contribuciones relativas de distintas fuentes al PM_{2.5} urbano: nucleación de nuevas partículas (36,5%), emisiones de vehículos a gasolina (27,9%), vehículos diésel (18,9%) y aerosoles secundarios (10,6%) (34). La combustión de biomasa para uso doméstico, como la quema de leña, residuos agrícolas y carbón vegetal, es un componente subestimado en el análisis global, siendo especialmente alta en África subsahariana y Asia del sur, donde puede superar el 50% del PM_{2.5} total en determinadas estaciones (33).

La capacidad de penetración en el árbol respiratorio sigue una relación no lineal con el diámetro: las partículas de 1-5 µm presentan la mayor probabilidad de deposición alveolar por impacción, sedimentación y difusión. Las UFP escapan a estos mecanismos convencionales y se depositan por difusión browniana en la región alveolar, con alta eficiencia de translocación sistémica (12). Esta característica hace de las UFP una fracción de toxicidad potencialmente mayor, aunque su regulación ambiental está ausente en todos los marcos normativos actuales.

2.1.3. Mecanismos fisiopatológicos

El estrés oxidativo es el mecanismo mejor documentado mediante el cual el PM y los contaminantes gaseosos producen daño pulmonar. El PM_{2.5} genera especies reactivas de oxígeno (ROS) por dos vías: directamente, a través de sus componentes metálicos y orgánicos que catalizan reacciones redox; e indirectamente, al activar macrófagos alveolares y neutrófilos, que amplifican la producción de ROS mediante la NADPH oxidasa y la mieloperoxidasa (35). Cuando la acumulación de

ROS supera la capacidad de los antioxidantes endógenos (como glutatión reducido, superóxido dismutasa y catalasa), se produce daño oxidativo a lípidos de membrana, proteínas y ADN (35).

El desequilibrio oxidante-antioxidante activa el factor de transcripción NF- κ B, encargado de regular la expresión de genes proinflamatorios, incluidos los que codifican para interleucinas, quimiocinas, moléculas de adhesión y ciclooxigenasa-2 (36). Un estudio transversal en 2.199 adultos coreanos del estudio KoGES-HEXA confirmó que la exposición de corta duración a la contaminación ambiental induce simultáneamente daño oxidativo y respuesta inflamatoria, con una contrarregulación antiinflamatoria que resulta insuficiente para neutralizar los efectos adversos (37). El ozono troposférico, por su parte, activa una vía específica de muerte celular denominada oxeiptosis, que desencadena receptores TLR, DAMPs e inflammasomas, generando una respuesta inflamatoria innata estéril (38).

La cascada inflamatoria inducida por el PM involucra múltiples mediadores y tipos celulares. Las células epiteliales bronquiales y los macrófagos alveolares son las primeras en responder: al ser activados por el PM, secretan citocinas proinflamatorias (IL-6, IL-8, TNF- α) que atraen neutrófilos y monocitos circulantes (36). Simultáneamente, el epitelio dañado libera alarminas (IL-33, linfopoyetina estromal tímica e IL-25), activando células linfoides innatas tipo 2 (ILC2), desencadenando una respuesta de tipo Th2, característica del asma alérgica (39).

El inflammasoma NLRP3 es un nexo entre la inflamación y el estrés oxidativo: las partículas inorgánicas y los cristales de silicio presentes en el PM activan este inflammasoma, que libera IL-1 β e IL-18, mediadores de la inflamación neutrofílica

(39). La activación del receptor de aril-hidrocarburo (AhR) por los PAH añade otra dimensión, pues el AhR regula la expresión de enzimas del citocromo P450 (CYP1A1, CYP1B1), que metabolizan los PAH a epóxidos reactivos con capacidad mutagénica (39). Esta vía es especialmente relevante en la carcinogénesis pulmonar asociada a la contaminación del aire.

El epitelio respiratorio, desde la mucosa nasal hasta el epitelio alveolar tipo I, es la primera barrera física contra los contaminantes inhalados. Su integridad depende de complejos de uniones estrechas (tight junctions) formados por proteínas como ZO-1, ocludina y claudinas. La exposición a PM, ozono y NO₂ disocia estos complejos, aumenta la permeabilidad paracelular y facilita la penetración de alérgenos y patógenos a tejidos subepiteliales (40). Esta disfunción no es solo un evento inicial, sino que perpetúa mediante la inhibición del aclaramiento mucociliar, que el PM deteriora al reducir la frecuencia de batido ciliar y alterar la viscoelasticidad del moco (5).

En exposiciones crónicas, el daño epitelial repetido activa la señalización TGF- β , que induce la transición epitelio-mesénquima (EMT), en la cual las células pierden marcadores diferenciadores (E-cadherina, ZO-1) y adquieren un fenotipo mesenquimal con expresión de vimentina, alfa-actina de músculo liso y colágeno tipo I (41). La EMT es un mecanismo de la remodelación fibrótica observada en EPOC avanzada y está implicada en las etapas iniciales de la carcinogénesis (41). Los xenobióticos ambientales en el PM (PAH, COV, metales pesados) exacerbaban este proceso mediante la activación de NF- κ B, AhR y TGF- β , con efectos que se amplifican mutuamente (42).

La respuesta inmune frente al PM opera en dos niveles. En el plano de la inmunidad innata, los macrófagos alveolares intentan fagocitar las partículas depositadas en el espacio alveolar, pero la sobrecarga de PM_{2.5} satura su capacidad fagocítica y deteriora su función, comprometiendo tanto la eliminación de partículas como la defensa contra patógenos (43).

En el plano de la inmunidad adaptativa, la contaminación cambia la respuesta según la enfermedad. En el asma, el PM favorece el perfil Th2, mediado por IL-4, IL-5 e IL-13, que promueve la producción de IgE, la activación de mastocitos y la eosinofilia tisular (43). En la EPOC, predomina la inflamación Th1/Th17 con neutrofilia y producción de IL-17, que perpetúa la destrucción del parénquima y la remodelación de la pequeña vía aérea (40). Transversal a ambas enfermedades es la regulación epigenética, pues el PM induce cambios en la metilación del ADN y modificaciones de histonas que alteran la expresión de genes inmunorreguladores, con posibilidad de transmisión intergeneracional (39). El gen Tet1, involucrado en la desmetilación activa del ADN, ha sido identificado como regulador de la inflamación de las vías aéreas inducida por contaminantes (39).

2.1.4. Efectos Respiratorios Específicos

El asma bronquial afecta aproximadamente a 300 000 000 personas en todo el mundo. La contaminación del aire actúa como factor de riesgo para el desarrollo de nuevos casos, especialmente en niños, y también como desencadenante de exacerbaciones agudas (44). Los mecanismos incluyen la activación de mastocitos y eosinófilos por PM_{2.5}, el incremento de la hiperreactividad bronquial por NO₂, el

broncoespasmo reflejo inducido por O₃ vía receptores TRPA1 y la broncoconstricción directa por SO₂ (40).

El metaanálisis de Huang et al. (2022), que sistematizó 84 estudios internacionales bajo diseño de series temporales, documentó los siguientes riesgos relativos: PM_{2.5} en el día de exposición (lag0) con RR=1,007 (IC 95%: 1,005–1,010) por 10 µg/m³; NO₂ con RR=1,010 (IC 95%: 1,006–1,014); O₃ con RR=1,005 (IC 95%: 1,002–1,009), con efectos más pronunciados en niños (45). Un análisis de 3,19 millones de visitas a urgencias por asma en diez estados de EE.UU. confirmó una tasa de riesgo de 1,016 (IC 95%: 1,008–1,025) por 6,3 µg/m³ de PM_{2.5} acumulado en 8 días, con mayor riesgo en niños de 1 a 4 años y adultos mayores de 65 (46). Cohortes europeas confirmaron que las asociaciones con NO₂ son significativas incluso por debajo de los límites legales de la Unión Europea (47), y para la fracción PM₁ se documentó OR=1,25 (IC 95%: 1,00–1,56) para hospitalización por asma (48), lo que sugeriría que las fracciones submicrónicas merecen también una consideración regulatoria.

La EPOC es la quinta causa global de DALYs, con aproximadamente 81 600 000 años de vida perdidos en 2017. Si bien el principal factor de riesgo es el tabaquismo, la exposición crónica a PM_{2.5} actúa como factor independiente para el desarrollo de EPOC, en especial en poblaciones no fumadoras de países con alta contaminación (49). Los mecanismos involucran inflamación crónica neutrofílica de las vías aéreas pequeñas, destrucción del parénquima por desequilibrio proteasa-antiproteasa agravado por estrés oxidativo, remodelación bronquial con metaplasia escamosa y fibrosis peribronquial, y depleción de antioxidantes pulmonares (5). Un análisis de multimorbilidad en el UK Biobank estableció que PM_{2.5} se asocia con el patrón

EPOC más asma con OR=1,24 (IC 95%: 1,16–1,33), y NO₂ con OR=1,26 (IC 95%: 1,15–1,38), en relación dosis-respuesta (50).

Las exacerbaciones agudas de EPOC (AECOPD) son el evento de mayor morbimortalidad. Un metaanálisis sobre PM_{2.5} y PM₁₀ en AECOPD determinó que el riesgo de ingreso hospitalario aumenta con incrementos de 10 µg/m³ desde lag0 (eventos respiratorios el mismo día de la exposición a PM) hasta lag7 (eventos respiratorios siete días después de la exposición a PM), evidenciando una ventana de susceptibilidad temporalmente extendida (51). Una actualización específica cuantificó un aumento del 1,6% (IC 95%: 0,4–2,9%) en hospitalizaciones por EPOC por cada 10 µg/m³/día de PM_{2.5} (52). En adultos con EPOC, el monitoreo personal en tiempo real confirmó que la exposición diaria a contaminantes se asocia con cambios objetivos en síntomas y saturación de oxígeno, incluso a baja intensidad (53).

La exposición a PM y contaminantes gaseosos incrementa la susceptibilidad a infecciones respiratorias agudas (IRA) por varios mecanismos: deterioro del aclaramiento mucociliar, inhibición de la fagocitosis por sobrecarga de macrófagos alveolares, disrupción de la barrera epitelial e inmunosupresión local mediada por IL-10 y TGF-β (54). El GBD 2019 estableció que las infecciones respiratorias inferiores representan la segunda causa de muertes y DALYs atribuibles a la contaminación por partículas, después de las enfermedades cardiovasculares (55).

La cohorte danesa de Zhang et al. (2025), con seguimiento de 3 083 227 adultos durante 16 años y 322 035 casos incidentes de infección respiratoria baja, documentó lo siguiente: NO₂ HR=1,08 (IC 95%: 1,07–1,09 por 10 µg/m³), carbono

negro HR=1,07 (IC 95%: 1,06–1,08) y PM_{2.5} HR=1,04 (IC 95%: 1,03–1,04), con efectos que se mantuvieron por debajo de los límites de la UE y las guías OMS, lo que implica ausencia de umbral seguro (56). Un meta-análisis de 15 revisiones sistemáticas confirmó asociaciones para NO₂ con incidencia de infecciones respiratorias bajas en niños (RR=1,09; IC 95%: 1,03–1,16) y para PM_{2.5} con mortalidad por infección respiratoria baja en adultos (RR=1,204; IC 95%: 1,095–1,325) (57). En niños, la presencia de contaminantes de aire ambiental se asocian con mayor utilización de servicios de salud por asma y neumonía (58).

En octubre de 2013, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer de la OMS concluyó que la contaminación del aire ambiental, incluido el material particulado, son carcinógenos humanos de Grupo 1, la categoría de mayor certeza causal, con evidencia suficiente de que la exposición a esta contaminación causa cáncer de pulmón (59). Esta clasificación se sustentó en la concurrencia de evidencia de cohortes, estudios de casos y controles, estudios mecanísticos sobre el potencial genotóxico y mutagénico de los PAH, y la coherencia con los criterios de causalidad de Bradford Hill (59).

Una revisión de meta-análisis confirmó correlaciones entre PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, O₃ y COV con mayor incidencia y mortalidad por cáncer de pulmón, con control adecuado del confundimiento por tabaquismo (60). La cohorte coreana de Kim et al. (2025), de 35 775 participantes, 17 años y 7 155 casos, estableció que el tertil más alto de PM_{2.5} se asoció con HR=1,06 (IC 95%: 1,01–1,13) y el O₃ con HR=1,42 (IC 95%: 1,34–1,50) en todos los tertiles (61). El verdor ambiental (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI) resultó protector (HR=0,89; IC 95%: 0,86–0,91), lo que apunta a oportunidades de intervención desde el diseño

urbano (61). La actualización del metaanálisis comisionado por la OMS para las AQG 2021 confirmó la asociación entre exposición crónica a $PM_{2.5}$ y mortalidad por cáncer de pulmón (62).

Con la llegada del COVID-19, se puso en evidencia la interacción entre la exposición ambiental crónica y la susceptibilidad a infecciones virales respiratorias. El mecanismo más estudiado implica la sobreexpresión de ACE-2, receptor de entrada del COVID-19 en el epitelio respiratorio. La activación del receptor de aril-hidrocarburo (AhR) por $PM_{2.5}$ induce la expresión del gen ACE-2, cuya región promotora contiene nueve secuencia de consenso AhR, facilitando así la entrada viral. (63). Un análisis de 110 provincias italianas confirmó correlaciones positivas entre $PM_{2.5}$ e incidencia ($r=0,67$; $p<0,0001$), mortalidad ($r=0,65$; $p<0,0001$) y letalidad ($r=0,70$; $p<0,0001$) de COVID-19, validando la vía AhR-ACE2 mediante un análisis bioinformático (63).

En un estudio de aleatorización mendeliana de dos muestras, que empleó variantes genéticas individuales para reducir el sesgo por factores socioeconómicos y conductuales, se observó que un aumento en la exposición a material particulado se asoció con mayor gravedad de COVID-19. La concentración de $PM_{2.5}$ se asoció con un aumento de más de tres veces en la probabilidad de COVID-19 grave (OR 3,29; IC 95%: 1,48–7,35; $p=0,0036$), la absorbancia de $PM_{2.5}$ con un incremento de más de cinco veces (OR 5,62; IC 95%: 1,98–15,94; $p=0,0012$) y el PM_{10} con un aumento cercano a cuatro veces (OR 3,74; IC 95%: 1,52–9,20; $p=0,0041$), sin evidencia de relación causal con la susceptibilidad a la infección, sino con la severidad clínica una vez adquirida la enfermedad (64).

En la cohorte de Greater Manchester, que incluyó 313 657 individuos, se observó que un mayor nivel de exposición a PM_{2.5} se asoció con un incremento del 27% en el riesgo de ingreso hospitalario por COVID-19 (OR 1,27; IC 95%: 1,25–1,30) y del 39% en el riesgo de mortalidad a 28 días (OR 1,39; IC 95%: 1,31–1,48), con efectos más pronunciados en adultos mayores, personas con obesidad, fumadores y sujetos con comorbilidades (65). En un estudio ecológico que incluyó 3 076 condados de Estados Unidos, el NO₂ fue el contaminante atmosférico más consistentemente asociado con la mortalidad por COVID-19, observándose un incremento del 16,2% (IC 95%: 8,7–24,0%) en el riesgo de fallecimiento por cada incremento de un rango intercuartílico en la concentración de NO₂ (4,6 ppb) (66). Asimismo, el metaanálisis de Sheppard et al. (2023) concluyó que existe evidencia de que el PM_{2.5} aumenta el riesgo de infección y de enfermedad grave por COVID-19, mientras que la evidencia para mortalidad, aunque sugestiva, es más débil (67).

2.1.5. Análisis crítico

La revisión conjunta de los estudios permite identificar una secuencia fisiopatológica bastante clara, que se inicia con el estrés oxidativo inducido por el PM_{2.5} y puede progresar hasta la remodelación tisular, e incluso el desarrollo de una neoplasia. En ese proceso, mecanismos como la activación de NF-κB y del inflammasoma NLRP3 cumplen un papel central, ya que ayudan a explicar tanto las exacerbaciones agudas del asma como el daño crónico que, con el tiempo, puede llevar a fibrosis en casos avanzados de EPOC. En otras palabras, no se trata de una interpretación forzada, sino de la expresión de vías biológicas comunes que, según la intensidad y duración de la exposición, la composición del contaminante y la

susceptibilidad de cada persona, pueden manifestarse en distintas enfermedades respiratorias.

La vía del receptor de aril-hidrocarburo (AhR) merece una consideración particular. Su activación por los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en el material particulado permite vincular, dentro de un mismo marco fisiopatológico, los efectos carcinogénicos reconocidos por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer desde 2013 (59) con el mayor riesgo de COVID-19 grave documentado (64). Por tanto, no se trata de efectos aislados que coinciden en el pulmón, sino de manifestaciones distintas de una misma alteración molecular. Desde el punto de vista clínico, un paciente expuesto crónicamente a concentraciones elevadas de material particulado no solo enfrenta mayor riesgo de EPOC o cáncer de pulmón, sino que además presenta una condición biológica de vulnerabilidad frente a infecciones respiratorias virales graves.

El nivel de certeza causal, sin embargo, no es uniforme entre patologías. En asma y EPOC, los metaanálisis muestran resultados consistentes en distintos contextos poblacionales (45,51). Para el cáncer de pulmón, el nexos causal es más sólido, afianzado desde la clasificación de la contaminación del aire como carcinógeno del Grupo 1 por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (59). Para infecciones respiratorias y COVID-19, aunque estudios recientes (56,64) fortalecen la inferencia causal más allá de una simple asociación estadística, la magnitud de esos hallazgos debe interpretarse con prudencia antes de extrapolarse de manera directa a otras poblaciones.

Persisten, además, zonas de evidencia insuficiente. Las partículas ultrafinas carecen de regulación específica en cualquier marco normativo internacional y no cuentan con estudios epidemiológicos de largo plazo que permitan dimensionar su impacto en salud, a pesar de que los modelos de deposición y los estudios mecanísticos señalan una toxicidad por unidad de masa superior a la del PM_{2.5} convencional (28). Desde la perspectiva de la salud ocupacional y ambiental, esta brecha es especialmente problemática, puesto que en la práctica solo se regula aquello que se mide, y las partículas ultrafinas no forman parte de la vigilancia rutinaria en ningún sistema de monitoreo nacional.

Algo similar ocurre con la evaluación conjunta de contaminantes. La mayor parte de los estudios analizados estudia un contaminante por vez, cuando la exposición real es simultánea. La combinación PM_{2.5}-ozono, con efectos potencialmente aditivos o sinérgicos ya documentados (24), no está incorporada en los criterios de las guías internacionales ni en los estándares de calidad ambiental peruanos. Si la normativa considera el PM_{2.5} de manera aislada corre el riesgo de subestimar el daño real, particularmente en ciudades donde el material particulado coincide temporal y espacialmente con episodios de contaminación fotoquímica. La ciudad de Lima responde plenamente a este escenario.

Los efectos epigenéticos transgeneracionales del material particulado constituyen otra línea de investigación no explorada. La evidencia disponible proviene mayoritariamente de modelos experimentales y de algunos estudios en humanos que han documentado cambios en patrones de metilación de ADN (39); no obstante, aún no se ha establecido si estas modificaciones persisten en la descendencia ni bajo qué condiciones podrían expresarse. En infecciones respiratorias agudas, las

revisiones más recientes señalan además una marcada heterogeneidad metodológica en la definición de caso, la estimación de la exposición y el ajuste por variables meteorológicas confusoras (57), lo que complica la comparación directa de resultados.

Los diseños de estudio disponibles imponen límites adicionales a la interpretación de resultados. Los estudios ecológicos no permiten asignar exposición a nivel individual y son vulnerables a la falacia ecológica (66), de modo sus resultados deben leerse como señales de riesgo poblacional, no como estimaciones válidas para cada persona. Los estudios de series temporales capturan con mayor precisión los efectos agudos, pero no son la herramienta adecuada para cuantificar desenlaces crónicos como el cáncer de pulmón. A esto se agrega que la mayoría de cohortes revisadas proviene de Europa del Norte, Norteamérica y Asia oriental, contextos con patrones de contaminación, composición del material particulado, perfil genético, estado nutricional y acceso a servicios de salud que pueden diferir sustancialmente de los observados en América Latina.

Lima registra con frecuencia concentraciones de PM_{2.5} que triplican los valores guía propuestos por la OMS en 2021. Esta situación obedece a la confluencia de un parque automotor envejecido, alta proporción de vehículos diésel, quema de residuos, focos industriales concentrados y condiciones topográficas que favorecen episodios de inversión térmica, fenómeno similar al que dificulta la dispersión de contaminantes en ciudades como Los Ángeles o Ciudad de México. El resultado es una exposición crónica elevada, particularmente en zonas periurbanas con menor acceso a recursos, donde las enfermedades respiratorias crónicas figuran ya entre las principales causas de morbilidad y mortalidad.

La extrapolación directa de los riesgos relativos estimados en cohortes europeas o norteamericanas debe hacerse, por ello, con cautela. Los patrones de mezcla de contaminantes, la prevalencia de comorbilidades y las condiciones de vida pueden amplificar o atenuar la magnitud del efecto observado. Con todo, la dirección del efecto es consistente entre regiones y los mecanismos fisiopatológicos involucrados son comunes a nivel biológico, lo que respalda asumir que la contaminación del aire ejerce un impacto real sobre la salud respiratoria en Lima, aun cuando las estimaciones precisas de riesgo varíen. Esto refuerza la necesidad de consolidar redes de monitoreo más densas y confiables, fortalecer la vigilancia epidemiológica de las enfermedades respiratorias y diseñar políticas de control de emisiones que prioricen a los grupos más vulnerables: niños, personas mayores y trabajadores que, además de la exposición ambiental, enfrentan cargas ocupacionales adicionales.

2.2. Marco normativo y antecedentes nacionales sobre calidad de aire y enfermedades respiratorias en el Perú

2.2.1. Antecedentes del Marco Normativo Ambiental en el Perú

La evolución del marco legal ambiental peruano fue un proceso progresivo, propiciado por el respaldo científico respecto a los daños de la contaminación y por la adhesión a tratados globales, destacando la Conferencia de Río de 1992. Durante la década de 1990, el Estado peruano carecía de un organismo rector en materia ambiental, y la gestión sectorial fragmentada dificultaba la implementación de estándares homogéneos. El Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), creado en 1994, significó el primer esfuerzo por consolidar una política ambiental integral.

Sin embargo, sus facultades se restringieron a lo normativo y concertador, careciendo de una verdadera capacidad de fiscalización (11).

El reconocimiento de Lima-Callao como zona crítica de contaminación atmosférica dio origen al Decreto Supremo N.º 074-2001-PCM. Este decreto aprobó el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire y estableció Lima-Callao como una Zona de Atención Prioritaria (ZAP) (68). Esta decisión respondía a datos de monitoreo que mostraban concentraciones de material particulado muy superiores a los estándares de la OMS. Años después, el D.S. N.º 069-2003-PCM amplió la regulación al plomo y el D.S. N.º 003-2008-MINAM incorporó el benceno y el hidrógeno sulfurado como parámetros regulados (11).

2.2.1.1. Ley General del Ambiente (Ley 28611)

El sistema ambiental peruano se rige principalmente por la Ley General del Ambiente (Ley N.º 28611), promulgada en octubre de 2005. Dentro de esta norma, específicamente en el artículo 31,1, se introducen los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Estos estándares se definen como los niveles seguros de concentración de sustancias o elementos en los recursos naturales (aire, suelo y agua) que actúan como receptores, asegurando que su impacto no represente una amenaza para las personas ni para la naturaleza (69). Esta definición es relevante desde la perspectiva de la salud ocupacional y ambiental porque delimita el concepto de riesgo "significativo", reconociendo implícitamente que incluso dentro de los límites establecidos pueden existir efectos adversos sobre la salud.

La Ley General del Ambiente también consagra en su artículo 26 el principio de prevención y el derecho de los ciudadanos a habitar en un entorno saludable y apto

para la vida. Asimismo, compromete al Estado en fomentar la participación ciudadana en la gestión ambiental y actualizar periódicamente los ECA conforme avance el conocimiento científico (69).

2.2.1.2. Creación del MINAM (2008)

El Decreto Legislativo N.º 1013, de mayo de 2008, creó el Ministerio del Ambiente (MINAM) como organismo del Poder Ejecutivo rector en materia ambiental. La creación del MINAM supuso la absorción de las funciones del CONAM y la articulación de entidades adscritas como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), este último creado en el mismo año (70). A partir de 2008, la gobernanza ambiental en materia de calidad del aire quedó organizada en tres niveles complementarios: el MINAM como ente rector y normatizador, el SENAMHI y la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) como organismos técnicos de monitoreo y vigilancia, y el OEFA como organismo de fiscalización y sanción (70).

2.2.1.3. Zona de Atención Prioritaria (ZAP) de Lima desde 2001

El concepto de Zona de Atención Prioritaria fue introducido formalmente por el D.S. N.º 074-2001-PCM, que identificó a Lima-Callao como la primera y principal ZAP del país, en razón de sus altos índices de contaminación y la magnitud de la población expuesta, más de 10 000 000 de personas al momento de la declaratoria, cifra que supera los 11 000 000 en la actualidad (68). La condición de ZAP implica la obligación del Estado de elaborar y ejecutar Planes de Acción para el Mejoramiento de la Calidad del Aire, así como de implementar redes de monitoreo representativas y de comunicar periódicamente el estado de la calidad del aire a la

ciudadanía. Esta condición fue ratificada y actualizada por el D.S. N.º 003-2017-MINAM, norma principal actualmente vigente en materia de ECA para Aire (11).

2.2.2. Normativa Peruana Vigente sobre Calidad de Aire

2.2.2.1. ECA para Aire: D.S. N.º 003-2017-MINAM

El Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM, publicado el 7 de junio de 2017, aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire. Derogó las normas previas (D.S. N.º 074-2001-PCM, N.º 069-2003-PCM, N.º 003-2008-MINAM y N.º 006-2013-MINAM), consolidando todos los parámetros de calidad del aire en un único cuerpo normativo (11). Los ECA son de cumplimiento obligatorio como referente para instrumentos de gestión ambiental; no constituyen límites de emisión para fuentes específicas (función que corresponde a los Límites Máximos Permisibles), sino niveles de concentración en el cuerpo receptor (aire ambiente).

Tabla 4. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire vigentes en el Perú

Parámetro	Período de promediación	Valor (µg/m³)
Material Particulado PM2.5	24 h	50
Material Particulado PM2.5	Anual	25
Material Particulado PM10	24 h	100
Material Particulado PM10	Anual	50
Dióxido de Azufre (SO ₂)	24 h	250
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 h	200
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Anual	100
Monóxido de Carbono (CO)	1 h	30 000

Monóxido de Carbono (CO)	8 h	10 000
Ozono (O ₃)	8 h	100
Benceno	Anual	4
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	24 h	150
Plomo en PM ₁₀	Mensual	1,5
Plomo en PM ₁₀	Anual	0,5
Mercurio Gaseoso Total	24 h	2

Fuente: Adaptado del D.S. N.º 003-2017-MINAM (11)

Cabe subrayar que los ECA para PM_{2.5} vigentes (25 µg/m³ anuales; 50 µg/m³ en 24 horas) son considerablemente más permisivos que las directrices internacionales actuales. Estudios publicados en revistas indexadas han señalado que estos valores duplican los estándares de referencia de la OMS y probablemente no protegen adecuadamente la salud de la población peruana (9,71). El artículo 31,4 de la Ley N.º 28611 establece la obligación de actualizar los ECA con una periodicidad no mayor a cinco años; sin embargo, el D.S. N.º 003-2017-MINAM lleva más de ocho años vigente sin revisión integral (69).

2.2.2.2. Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire (D.S. N.º 010-2019-MINAM)

El Decreto Supremo N.º 010-2019-MINAM, publicado el 2 de diciembre de 2019, aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, instrumento técnico que estandariza los criterios para el monitoreo atmosférico en todo el territorio nacional (12). Su objetivo central es generar información de

calidad, comparable, compatible, confiable y representativa, condición indispensable para la gestión basada en evidencia.

Según lo dispuesto en el protocolo (12) , se contemplan tres tipos de monitoreo: el primero, enfocado en los planes de mejora del aire para centros urbanos y ZAP; el segundo, destinado a vigilar el impacto de sectores productivos, de servicios y extractivos; y el tercero, orientado a prevenir y evaluar las amenazas a la salud ambiental..

Define los métodos oficiales y alternativos para medir los contaminantes regulados por los ECA, y establece las reglas para garantizar que la información sea exacta y confiable. Una disposición técnica es la obligatoriedad de acreditación ante el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) de los organismos que realicen monitoreos cuyos resultados sean comparados con ECA. Esta exigencia no ha sido completamente cumplida, tal como lo evidencia el D.S. N.º 017-2025-MINAM, que amplía los plazos de acreditación para entidades del sector público (17).

2.2.2.3. INCA - Índice de Calidad del Aire (R.M. N.º 181-2016-MINAM)

La Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM, establece el Índice de Calidad del Aire (INCA) como herramienta de comunicación ciudadana. El INCA simplifica la información técnica en una escala numérica y cromática de seis categorías comprensibles para la población general (13).

Tabla 5. Escala del Índice de Calidad del Aire (INCA)

Calificación	Rango INCA	Color	Descripción de riesgo
--------------	---------------	-------	-----------------------

Buena	0 – 50	Verde	Calidad aceptable; riesgo nulo o mínimo para la población general
Moderada	51 – 100	Amarillo	Riesgo moderado para grupos excepcionalmente sensibles
Insalubre para Grupos Sensibles	101 – 150	Naranja	Riesgo para cardíacos, enfermos pulmonares, adultos mayores y niños
Insalubre	151 – 200	Rojo	Riesgo para toda la población
Muy Insalubre	201 – 300	Violeta	Alertas de salud; riesgo grave para todos los grupos
Peligroso	> 300	Granate	Emergencia sanitaria; efectos graves para toda la población

Fuente: Adaptado de la R.M. N° 181-2016-MINAM (13).

Metodológicamente, el INCA se basa en el Air Quality Index (AQI) de la EPA de EE. UU., adaptando los puntos de corte a los valores ECA nacionales. El cálculo emplea promedios móviles de 1 hora (NO₂, CO), 8 horas (O₃) y 24 horas (PM₁₀, PM_{2.5}). Dado que los ECA peruanos son más permisivos que las directrices internacionales, el INCA puede clasificar el aire como "Bueno" o "Moderado" en condiciones que la OMS consideraría de riesgo para grupos sensibles (71). Esta limitación es relevante para la medicina ocupacional y ambiental, pues las categorías del INCA no equivalen a las categorías de seguridad de las guías OMS.

2.2.2.4. INFO AIRE PERÚ y SINIA

Mediante la R.M. N.º 181-2016-MINAM, norma que también dio origen al INCA, se implementó el Sistema de Información de Calidad del Aire (INFO AIRE PERÚ) bajo la estructura del SINIA (13). Esta plataforma recopila la información en tiempo real proveniente de la REMCA del SENAMHI, las siete estaciones de la DIGESA en Lima y Callao, y las más de 40 estaciones administradas por el OEFA, con el fin de emitir reportes de vigilancia cada mes. No obstante, este modelo de integración

presenta limitaciones en su alcance geográfico. Departamentos de la Amazonía como Madre de Dios, Loreto y Amazonas no cuentan con estaciones de medición automática y continua, lo que imposibilita el seguimiento constante durante las temporadas de quemas.

2.2.2.5. Actualizaciones recientes: D.S. N° 011-2023-MINAM y D.S. N° 017-2025-MINAM

Con la publicación del Decreto Supremo N.º 011-2023-MINAM, la normativa ambiental peruana extendió su control de contaminantes al incluir estándares de calidad ambiental para cadmio, arsénico y cromo contenidos en el material particulado (16). Los límites anuales fijados fueron de 5 ng/m³, 6 ng/m³ y 100 ng/m³, respectivamente. La inclusión de estos metales pesados obedeció tanto a las demandas de colectivos de derechos humanos como a hallazgos científicos que alertaban sobre la toxicidad en localidades de alta actividad minero-metalúrgica, tales como Cerro de Pasco y La Oroya.

Posteriormente, se promulgó el Decreto Supremo N.º 017-2025-MINAM con el fin de viabilizar la gestión de la calidad del aire. Esta norma concedió prórrogas a las instituciones del Estado para que certifiquen sus procedimientos de medición ante el INACAL, evidenciando que un sector importante de la red de monitoreo oficial todavía no se adecúa a las exigencias planteadas originalmente en el D.S. N.º 010-2019-MINAM. (17).

2.2.3. Políticas y Planes de Acción

2.2.3.1. Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en Lima y Callao 2021-2025 (R.M. N.º 142-2021-MINAM)

Aprobado el 28 de julio de 2021 mediante R.M. N.º 142-2021-MINAM, el Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en Lima y Callao 2021-2025 constituye el principal instrumento de política pública para reducir la contaminación ambiental en la metrópoli (14). Contiene 42 medidas consensuadas entre el MINAM, los gobiernos regionales de Lima y Callao, y los ministerios de Transportes, Salud y Producción. Su eje central es la reducción de emisiones vehiculares, dado que el parque automotor concentra aproximadamente el 58% de las emisiones de PM_{2.5} en Lima (14).

Las medidas principales incluyen la implementación de zonas de baja emisión, la restricción del uso de artefactos pirotécnicos en actividades municipales, el refuerzo de la vigilancia sobre las emisiones vehiculares, y la expansión de espacios peatonales y ciclovías. Al 2022, el avance en la ejecución de las medidas era del 59% (14). El plan es sucesor del PISA I (2005-2010), PISA II, PISA III y del Plan Lima-Callao 2019-2023.

2.2.3.2. Política Nacional del Ambiente al 2030

La Política Nacional del Ambiente al 2030 fue aprobada mediante D.S. N.º 023-2021-MINAM el 25 de julio de 2021. Constituye el documento de política de más alto nivel en materia ambiental y establece nueve objetivos prioritarios. El Objetivo Prioritario 3 tiene con metas cuantificables al 2030 en materia de calidad del aire: el 50% de las Zonas de Atención Prioritaria del país deben alcanzar una calificación de "Buena" según el INCA; y se persigue la disminución de emisiones de gases contaminantes asociados al material particulado (15). La consecución de estas metas requiere una convergencia de acciones en los sectores transporte, industria,

energía y gestión de residuos sólidos, así como la actualización de los ECA hacia valores más protectores de la salud.

2.2.4. Sistemas de Información y Vigilancia

2.2.4.1. Red de Monitoreo del SENAMHI (estaciones REMCA)

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) opera la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA) en el Área Metropolitana de Lima y Callao (AMLC), conformada por 10 estaciones que miden concentraciones horarias de PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 y CO . Se distribuyen en cuatro macro-zonas: Lima Norte, Lima Este, Lima Centro y Lima Sur. Fuera de Lima, el SENAMHI dispone de estaciones en Arequipa y Ancash, aunque la cobertura fuera de la capital sigue siendo muy limitada.

La evaluación del sistema de monitoreo peruano adquiere mayor relevancia cuando se contrasta con las recomendaciones técnicas internacionales sobre diseño de redes de vigilancia de calidad del aire. La Organización Mundial de la Salud, en sus directrices de 2021, y la EPA de los Estados Unidos establecen criterios para garantizar la representatividad de las mediciones urbanas. En zonas urbanas con más de 1 millón de habitantes, se recomienda una densidad mínima de una estación de monitoreo de $PM_{2.5}$ por cada 100 a 400 km^2 de área, en función de las fuentes de emisión y la variabilidad meteorológica local. Para Lima, cuya área supera los 2 800 km^2 , esta referencia implicaría contar con entre 7 y 28 estaciones, umbral que la red REMCA-SENAMHI, con sus 10 estaciones activas, apenas alcanza en su límite inferior. Respecto a los criterios de ubicación, la normativa internacional establece que las estaciones de monitoreo de $PM_{2.5}$ no deben situarse a menos de

25 metros de vías de alto tráfico vehicular ni a menos de cinco metros de cualquier obstáculo físico que altere el flujo del aire. Las estaciones orientadas a evaluar la exposición de la población general deben ubicarse a distancias superiores a 500 metros de focos industriales puntuales, mientras que las estaciones de "hotspot" se diseñan expresamente para caracterizar las exposiciones máximas. La REMCA no declara públicamente los criterios técnicos de ubicación de cada una de sus estaciones ni las clasifica según su función, lo que limita la interpretabilidad de las comparaciones entre estaciones y el cálculo de la exposición poblacional promedio.

En julio de 2025, el SENAMHI registró concentraciones de PM_{10} superior al ECA en las estaciones Pariachi, San Borja y Santa Anita. En ese mismo período, varias estaciones excedieron el ECA de $PM_{2.5}$ ($50 \mu g/m^3$). La Memoria Anual SENAMHI 2024 reportó 335 pronósticos de calidad del aire y 12 boletines mensuales.

2.2.4.2. Vigilancia epidemiológica del CDC Perú (IRA, neumonías)

El CDC Perú-MINSA mantiene una sala situacional de enfermedades respiratorias con reporte semanal de IRA y neumonía en menores de cinco años. Hasta la SE 36-2025, se registraron 1 333 018 episodios de IRA, una disminución del 5% respecto al mismo período de 2024 (72). Esta tendencia nacional encubre disparidades regionales: Pasco registró la tasa más elevada (10 566,96 episodios por 10 000 habitantes), seguido de Huancavelica (9 289,07), Apurímac (9 236,77) y Ucayali (9 023,65), regiones con alta exposición a contaminantes mineros y/o quemas de biomasa.

2.2.4.3. Reportes del INEI sobre morbilidad respiratoria

El Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) publica mensualmente estadísticas ambientales con datos de monitoreo del SENAMHI y del Ministerio de Salud. En el informe de enero de 2025, el INEI reportó concentraciones de PM₁₀ en Lima que variaron entre 7,3 µg/m³ en Villa María del Triunfo y 78,0 µg/m³ en San Borja durante diciembre de 2024, sin exceder el ECA en ninguna estación (73). El Anuario de Estadísticas Ambientales 2023 incluye series históricas de morbilidad respiratoria y calidad del aire que resultan útiles para el análisis de tendencias nacionales.

La vigilancia del INEI complementa la del Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (CDC Perú), vinculando variables ambientales con estadísticas vitales, aunque la integración sistemática entre ambas plataformas aún es incipiente (73). No obstante, la lectura conjunta de ambas fuentes permite una inferencia que los informes por separado no explicitan: en diciembre de 2024, la estación San Borja (SBJ) registró la concentración más alta de PM₁₀ del período con 78,0 µg/m³, valor que, si bien no excedió el ECA peruano de 24 horas, supera el límite de 45 µg/m³ de la directriz OMS 2021. La ausencia de incumplimientos del ECA nacional en ese mes no equivale a ausencia de riesgo, equivale únicamente a la ausencia de un incumplimiento normativo. Presentar ambos datos de manera articulada y no en capítulos separados de dos plataformas distintas revelaría la brecha entre lo que el ordenamiento jurídico considera "aceptable" y lo que la evidencia científica considera "protector". La falta de integración entre el sistema de vigilancia ambiental del INEI-SENAMHI y la vigilancia epidemiológica del CDC Perú no es un problema menor, es una limitación estructural que impide calcular con precisión la fracción de morbilidad

respiratoria atribuible a la contaminación del aire en períodos específicos, y que, por tanto, debilita la base de evidencia para la toma de decisiones normativas.

2.2.4.4. OEFA como organismo de fiscalización

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) opera más de 40 estaciones automáticas con analizadores de PM10, PM2.5, SO₂, CO y NO₂ en el territorio nacional (74). Entre enero y abril de 2025 emitió 248 alertas por contaminación del aire: 181 en Lurigancho-Chosica (Lima), 61 en La Oroya (Junín), cuatro en La Libertad y dos en Arequipa (74). El Portal PIFA permite consulta pública en tiempo real. El OEFA ejerce además competencias de fiscalización y sanción sobre actividades de minería, industria y electricidad, convirtiéndolo en un actor clave en la cadena de cumplimiento normativo.

2.2.5. Análisis Comparativo: ECA Peruanos vs. Directrices Internacionales

Para contextualizar los ECA peruanos, resulta indispensable compararlos con las tres referencias internacionales más relevantes: las Directrices Mundiales de la OMS (AQG 2021), los Estándares Nacionales de la EPA de EE. UU. (NAAQS 2024) y los límites de la Unión Europea (Directiva 2008/50/CE y revisión 2022). La OMS publicó el 22 de septiembre de 2021 unas directrices significativamente más restrictivas que las de 2005, basadas en una revisión sistemática de la evidencia sobre efectos adversos a bajas concentraciones de contaminantes (1). La EPA redujo en 2024 su estándar anual de PM_{2.5} de 12 a 9 µg/m³, mientras la UE propuso una convergencia hacia los valores OMS con metas al 2030 (75,76).

Tabla 6. Comparación de estándares de calidad del aire: ECA Perú vs. referentes internacionales

Contaminante	ECA Perú (D.S. 003-2017) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OMS AQG 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EPA NAAQS 2024 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	UE (Directiva vigente) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM _{2.5} (anual)	25	5	9	25
PM _{2.5} (24 horas)	50	15	35	-
PM ₁₀ (anual)	50	15	-	40
PM ₁₀ (24 horas)	100	45	150	50
NO ₂ (anual)	100	10	~100 *	40
SO ₂ (24 horas)	250	40	~365 *	125
O ₃ (8 horas)	100	100	~147 *	120

*Fuente: Elaboración propia a partir del D.S. N.º 003-2017-MINAM, OMS AQG 2021, EPA NAAQS 2024 y Directiva 2008/50/CE (1,11,75,76). *Valores aproximados, debido a que el estándar los define como partes por millón (ppm).*

La brecha más crítica se está en el PM_{2.5}, contaminante con la mayor evidencia acumulada de efectos cardiovasculares y respiratorios a largo plazo. El ECA peruano anual de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es cinco veces más permisivo que la directriz OMS 2021 (5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y casi tres veces superior al nuevo estándar de la EPA (9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En el PM_{2.5} de 24 horas, la brecha con la OMS es de 3,3 veces (50 vs. 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Para PM₁₀ anual, el ECA de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ triplica la guía OMS (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). El NO₂ anual peruano (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) es 10 veces superior al valor OMS (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2,5 veces el límite de la UE (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que resulta especialmente preocupante en Lima, donde las emisiones de NO₂ provienen principalmente del tráfico motorizado. El

SO₂ en 24 horas presenta la brecha más extrema: 250 µg/m³ peruano versus 40 µg/m³ de la OMS, con implicancias directas para las poblaciones próximas a fundiciones minero-metalúrgicas.

Investigadores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia publicaron en 2024, en la Revista Médica Herediana, que las normas peruanas duplican o más los valores de referencia de la OMS tanto para PM₁₀ como para PM_{2.5}, y que el país carece de un calendario público de convergencia hacia estándares más protectores (71). Un estudio en Environmental Health (2020) concluye que los límites peruanos de calidad del aire son probablemente demasiado permisivos y requieren revisión (9).

La evolución normativa comparada confirma el rezago peruano, pues Colombia, Chile y México han avanzado hacia valores más restrictivos en años recientes. Sin embargo, la dimensión más crítica de esta brecha no es simplemente técnica o comparativa, es una brecha de protección ambiental con consecuencias medibles sobre la salud de la población general, especialmente a las poblaciones vulnerables. En la práctica, mantener un ECA anual para PM_{2.5} de 25 µg/m³, cinco veces superior a la guía OMS 2021, significa que concentraciones asociadas por la evidencia científica con incrementos significativos de mortalidad cardiorrespiratoria, hospitalizaciones por asma y déficit del desarrollo pulmonar infantil son clasificadas como legalmente aceptables en el Perú. Esta situación no es neutral desde el punto de vista normativo,, implica que el Estado peruano carece de una base legal sólida para exigir a los responsables de actividades contaminantes una reducción hacia los niveles que la evidencia científica considera protectores. Cerrar esta brecha no requiere necesariamente alcanzar de inmediato la guía OMS 2021, sino establecer un calendario vinculante de convergencia progresiva que otorgue

certeza regulatoria a los titulares y permita evaluar el impacto de las reducciones escalonadas sobre la morbilidad respiratoria en Lima Metropolitana.

2.2.6. Antecedentes de Estudios Nacionales en Otras Regiones

2.2.6.1. Lima Metropolitana

El caso de Lima representa el foco de estudio con mayor cantidad de registros e información en el país. Un estudio por Tapia et al. (2020) analizó 86 970 muertes cardiorrespiratorias en Lima (2010-2016), hallando que un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{2.5}$ se asoció con un aumento del 2,9% en mortalidad combinada (RR 1,029; IC 95%: 1,005-1,052), con mayor efecto en personas mayores de 65 años (RR 1,048; IC 95%: 1,005-1,093). El $\text{PM}_{2.5}$ promedio limeño en ese período fue de $21,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ya por encima de la guía OMS 2005 ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) aunque formalmente dentro del ECA peruano (9).

Una investigación en Environmental Research (2021) evaluó 103 974 visitas de urgencias por asma entre 2010 y 2016, encontrando que un incremento de $6,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (RIQ) en $\text{PM}_{2.5}$ se asoció con un aumento del 3,7% en consultas de urgencias; en menores de 19 años el incremento fue del 5% (19). La distribución del riesgo es desigual: San Juan de Lurigancho registró el mayor $\text{PM}_{2.5}$ promedio ($32,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Magdalena del Mar el menor ($16,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), patrón atribuible a los vientos del Pacífico que empujan los contaminantes hacia Lima Este contra la Cordillera de los Andes. Un análisis de tendencias publicado en 2024 confirmó que, salvo en 2015, 2020 y 2023, todas las mediciones anuales de $\text{PM}_{2.5}$ en Lima excedieron el ECA peruano; el año 2020 fue la excepción por las restricciones de movilidad durante la pandemia (77).

2.2.6.2. Arequipa

Arequipa, segunda ciudad del país, presenta fuentes de contaminación tanto vehiculares como industriales, agravadas por su condición geográfica de cuenca atmosférica. Monitoreos del OEFA publicados en agosto de 2025 registraron niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ por encima de los ECA en zonas de la ciudad (74). Datos del DIGESA (78) consignaron concentraciones de PM_{10} de $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arequipa durante 2023, valor que triplica la guía OMS ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas).

2.2.6.3. Pasco y La Oroya

Cerro de Pasco es uno de los casos más documentados de contaminación por metales pesados en América Latina. Un informe de Source International (2024) documentó múltiples violaciones de límites nacionales (79). Un estudio CONCYTEC/ALICIA (2019) halló relación significativa entre PM_{10} de origen minero e IRA en la población de Cerro de Pasco (80). La Oroya concentró el 25% de las alertas del OEFA en el primer cuatrimestre de 2025 (74).

2.2.6.4. Lambayeque (Chiclayo)

En Chiclayo, las enfermedades del sistema respiratorio son el primer problema de salud de la población, con rinitis, faringitis y asma como las afecciones más prevalentes. Un estudio universitario (ALICIA, 2021) que analizó el período 2013-2015 determinó que la contaminación del aire en Chiclayo está impulsada principalmente por industrias locales de pequeña escala y el parque automotor, con una contribución importante de los gases de escape de vehículos con mantenimiento deficiente (81). La correlación entre PM_{10} , $PM_{2.5}$ y procesos asmáticos en la ciudad

fue confirmada por investigaciones de la Universidad Señor de Sipán, aunque la disponibilidad de datos de monitoreo continuo en la región Lambayeque es escasa.

2.2.6.5. Datos epidemiológicos nacionales sobre IRA

Las IRA son la causa de consulta ambulatoria más frecuente en el Perú. Al corte de la SE 15 de 2024, se habían registrado 408 587 episodios de IRA a nivel nacional (razón: 1 659,60 por 10 000 habitantes), versus 450 426 en el mismo período de 2023. En menores de cinco años, las infecciones respiratorias representan el 12,3% de las defunciones, siendo la segunda causa de mortalidad infantil tras las causas perinatales. La magnitud de esta carga está condicionada en parte por la brecha persistente entre los ECA nacionales y los valores de protección de la salud recomendados por la evidencia internacional.

2.2.7. Análisis crítico

2.2.7.1. Brecha normativa

El análisis de la normativa peruana revela una brecha fundamental entre los ECA vigentes y la mejor evidencia científica disponible. El D.S. N.º 003-2017-MINAM, al fijar el PM_{2.5} anual en 25 µg/m³, adoptó un valor equivalente al objetivo intermedio 2 (IT-2) de las directrices OMS 2005, cuando la evidencia acumulada justificaba ya valores más restrictivos (1). Con la publicación de las AQG OMS 2021, que reducen el PM_{2.5} anual a 5 µg/m³, la brecha se amplió de manera importante. Aunque el Estado peruano acata formalmente su normativa, en la práctica deja a miles de ciudadanos desprotegidos ante niveles de contaminación que la ciencia ya ha demostrado que son perjudiciales para la salud (71).

A diferencia de países de la región como Colombia (con metas progresivas al 2030 vía la Resolución 2254 de 2017) o Chile (con su norma escalonada para PM2.5 aprobada en diciembre de 2025), el Perú carece de un calendario oficial y obligatorio de actualización. Sin plazos ni valores meta definidos, el Estado pierde la capacidad regulatoria para exigir a las entidades fiscalizadas una reducción gradual de sus emisiones.

El estándar de calidad ambiental anual de Perú para el dióxido de nitrógeno ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) supera de forma alarmante los límites internacionales, es diez veces mayor que la guía de la OMS de 2021 ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2.5 veces superior al límite de la Unión Europea ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A pesar del consenso científico sobre los daños respiratorios e inflamatorios de este gas, este umbral permisivo resulta ineficaz en realidades como la de Lima, donde el parque automotor es el principal emisor y se requiere con urgencia incentivar el transporte limpio.

2.2.7.2. Factores Políticos, Socioeconómicos e Institucionales que Limitan la Actualización de los ECA

La prolongada inercia regulatoria del Estado peruano para actualizar sus Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire, así como las brechas descritas frente a las directrices de la OMS, no constituyen únicamente omisiones técnicas, sino que obedecen a dinámicas de economía política, presiones sectoriales e ineficiencias en la gobernanza institucional (71).

El primer factor de peso radica en la priorización de la viabilidad económica e industrial sobre los criterios de salud pública, lo cual genera un "sinceramiento regulatorio" que favorece a los sectores productivos y extractivos. La controversia

surgida tras la publicación del Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM ilustra con claridad esta tensión. Esta norma flexibilizó drásticamente el estándar diario (24 horas) para el dióxido de azufre (SO₂), incrementándolo de 20 µg/m³ a 250 µg/m³, un incremento de más de doce veces. Esta medida fue cuestionada por organizaciones de la sociedad civil y del ámbito de la salud debido a que constituyó un retroceso o regresión en la protección ambiental y sanitaria (71). La justificación oficial de esta flexibilización fue el sinceramiento de los estándares para hacer viable la reactivación del Complejo Metalúrgico de La Oroya y facilitar el proceso de licitación de la fundición, así como acomodar los requerimientos de la modernización de la Refinería de Talara de Petroperú para el refinado de crudo con alto contenido de azufre. Este caso evidencia cómo los intereses macroeconómicos sectoriales e industriales de corto plazo se imponen sobre el principio de prevención y el derecho constitucional a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de la vida.

El segundo factor se asocia con las barreras de modernización tecnológica y de infraestructura del sector energía y transportes en el país. Adoptar límites más estrictos de PM_{2.5} requeriría imponer límites máximos permisibles de emisión estrictos sobre las industrias metalúrgicas, cementeras y, fundamentalmente, sobre el parque automotor. En el Perú, las limitaciones para refinar combustibles con menos de 10 ppm de azufre a nivel nacional, sumadas a la inacción del Estado para regular y renovar de manera efectiva un parque automotor público con una antigüedad promedio que supera los 15 años, actúan como barreras insalvables para las carteras de Economía, Transportes y Energía. Estas carteras temen que la aprobación de ECA exigentes genere sobrecostos y paralizaciones operativas en

sectores productivos clave y en el transporte masivo urbano, lo que se traduce en un bloqueo interno para cualquier iniciativa de actualización.

El tercer factor es la debilidad institucional y la fragmentación de competencias en la gobernanza ambiental. De acuerdo con el artículo 31 de la Ley N.º 28611, los ECA deben revisarse de manera obligatoria cada cinco años. No obstante, el sistema carece de mecanismos o de sanción administrativa que obliguen a los funcionarios del MINAM a acatar este mandato, permitiendo que el D.S. N.º 003-2017-MINAM permanezca inalterado por más de ocho años. Además, el Ministerio de Salud, a través de la DIGESA, tiene un rol estrictamente consultivo y carece de peso político real en la toma de decisiones, en donde los ministerios de carácter productivo (MEF, MINEM y MTC) ejercen una influencia preponderante. La ausencia de un calendario vinculante con metas progresivas de actualización perpetúa un marco regulatorio permisivo y desalineado con la mejor evidencia científica disponible en medicina ocupacional y ambiental.

2.2.7.3. Fortalezas y debilidades del sistema de monitoreo

Entre las fortalezas del sistema de vigilancia destaca la REMCA, que con 10 estaciones automáticas en Lima-Callao genera datos horarios de cobertura representativa. El Índice de Calidad del Aire y el portal INFO AIRE PERÚ constituyen instrumentos avanzados de comunicación y difusión para la región. La red de la Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental aporta cobertura en áreas que escapan al monitoreo del SENAMHI, y la incorporación de ECA para metales en PM₁₀ mediante el D.S. N.º 011-2023-MINAM amplía la protección en zonas mineras.

Las debilidades son de igual magnitud. La cobertura fuera de Lima y Callao es insuficiente, regiones como Loreto, Amazonas y Madre de Dios carecen de monitoreo automático permanente, lo que impide cuantificar las exposiciones durante temporadas de quemas. La acreditación incompleta ante el Instituto Nacional de Calidad compromete el aseguramiento de calidad de los datos. El CDC Perú reporta las infecciones respiratorias agudas de forma agregada, sin estratificación por exposición ambiental a nivel distrital, lo que limita los análisis de dosis-respuesta fuera de Lima. La escasa integración entre los sistemas de información ambiental (INFO AIRE PERÚ y el Sistema Nacional de Información Ambiental) y los sistemas de salud dificulta la generación de evidencia epidemiológica que sustente una revisión normativa.

2.2.7.4. Comparación con avances normativos en países de la región

La evolución reciente de la normativa en Chile, Colombia y México pone en evidencia el retraso peruano en la actualización de los ECA. Colombia adoptó en 2017 la Resolución 2254 con un enfoque escalonado, que fijó para $PM_{2.5}$ un valor anual de $25 \mu g/m^3$ como meta inmediata y un objetivo de $15 \mu g/m^3$ al 2030, acompañado de una Estrategia Nacional de Calidad del Aire con metas de cumplimiento según el porcentaje de estaciones. Chile aprobó en diciembre de 2025 una nueva norma para $PM_{2.5}$ con un valor anual de $15 \mu g/m^3$ y uno diario de $38 \mu g/m^3$, en concordancia con las recomendaciones de la OMS. México, por su parte, actualizó en 2024-2025 la NOM-025 de la Secretaría de Salud y redujo el valor diario de $PM_{2.5}$ de 33 a $25 \mu g/m^3$. En contraste, el Perú no ha emitido desde 2017 ningún decreto de actualización de los ECA para $PM_{2.5}$, PM_{10} o dióxido de nitrógeno, lo que representa un rezago relativo en el contexto regional.

La comparación también muestra diferencias en los modelos de gobernanza. Chile dispone de planes de descontaminación con metas legalmente vinculantes. Colombia, por su lado, integra la calidad del aire en el Plan Nacional de Desarrollo con indicadores de seguimiento. El Perú, en cambio, carece de un instrumento normativo equivalente en exigibilidad y fiscalización, y la fragmentación de la vigilancia entre el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria y la OEFA, sin una plataforma única de datos integrados y validados, limita la generación de inteligencia ambiental accionable.

En conjunto, el marco normativo peruano ha avanzado en su arquitectura institucional, expresada en el Ministerio del Ambiente, la OEFA, la REMCA, el Índice de Calidad del Aire y el portal INFO AIRE PERÚ. No obstante, carece de una actualización significativa de los valores ECA conforme a la evidencia científica internacional actualizada. La brecha entre los ECA peruanos y las directrices OMS 2021 implica que amplios grupos poblacionales permanecen expuestos a concentraciones de contaminantes con efectos adversos documentados, mientras que la normativa vigente las clasifica dentro de límites aceptables. Cerrar esta brecha requiere revisar los valores numéricos de los ECA y construir un sistema integrado de monitoreo, epidemiología y fiscalización. En ello, la medicina ocupacional y ambiental tiene un papel central para documentar esta brecha y proponer intervenciones basadas en evidencia dirigidas a las poblaciones más vulnerables.

2.3. Morbilidad por enfermedad respiratoria y calidad de aire en Lima Metropolitana

2.3.1. Antecedentes y Contexto de Lima Metropolitana

Lima Metropolitana constituye el principal conglomerado urbano del Perú, con aproximadamente 11 millones de habitantes en el Área Metropolitana de Lima y Callao (AMLC), equivalente a cerca del 32% de la población nacional (82). La ciudad se ubica en una llanura costera árida, entre el nivel del mar y los 400 m s. n. m., y se eleva hacia las estribaciones andinas en el sector este. Esta topografía condiciona la dispersión de contaminantes: la cordillera actúa como barrera para su desplazamiento horizontal hacia el este, mientras los vientos del Pacífico Sur impulsan la masa contaminada hacia Lima Este y Lima Norte, generando un gradiente de exposición (19). A ello se añade la inversión térmica costera asociada a la Corriente de Humboldt, que retiene los contaminantes en los estratos bajos de la troposfera, con mayor intensidad entre junio y septiembre (83). La alta densidad de fuentes emisoras, barreras geográficas y condiciones meteorológicas adversas convierte a Lima en una ciudad especialmente vulnerable a la acumulación de material particulado.

La estructura demográfica de Lima incorpora, además, grupos poblacionales de alta susceptibilidad. Los menores de cinco años y los adultos mayores de 65 años se concentran en distritos periféricos con mayor exposición, mientras que el menor nivel socioeconómico acumulado en Lima Norte y Lima Este configura una doble vulnerabilidad que amplifica los efectos del material particulado sobre la salud (9). Esta desigualdad en la exposición resulta central para comprender las diferencias en la carga de enfermedad respiratoria entre los distintos sectores de la ciudad.

Lima fue declarada Zona de Atención Prioritaria para la calidad del aire en 2001 mediante el D.S. N.º 074-2001-PCM, condición ratificada por el D.S. N.º 003-2017-MINAM (11). Esta categoría implica la obligación de implementar Planes de Acción para el Mejoramiento de la Calidad del Aire. El Plan Lima-Callao 2021-2025, aprobado por la R.M. N.º 142-2021-MINAM, contempla 42 medidas consensuadas y registró un avance del 59% en 2022 (14). Que Lima continúe como ZAP después de más de dos décadas pone en evidencia la brecha estructural entre las metas normativas y la acción efectiva en materia de control de emisiones. A nivel normativo, los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA, D.S. N.º 003-2017-MINAM) establecen para $PM_{2.5}$ un valor de $50 \mu g/m^3$ para 24 horas y $25 \mu g/m^3$ como media anual, parámetros que duplican y quintuplican, respectivamente, las guías de la OMS 2021 ($15 \mu g/m^3$ en 24h y $5 \mu g/m^3$ anuales), y que no han sido revisados pese a la publicación de dichas guías en 2021 ni a la evidencia local que demuestra efectos en salud a concentraciones por debajo del ECA vigente (1,11).

El parque automotor es la fuente principal de emisiones, responsable de entre el 80% y el 90% del PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la ciudad (83). Lima posee una de las flotas vehiculares más antiguas y con mayor proporción de vehículos a diésel de América Latina. La industria representa la segunda fuente de importancia, especialmente en Independencia, Ate y Puente Piedra, donde coexisten zonas residenciales con ladrilleras, plantas metalmecánicas y manufactura textil que contribuyen PM_{10} y metales traza a la atmósfera (84). Un estudio ecológico de Fano-Sizgorich D et al. (2024), publicado en *Biomedicines*, asoció la concentración de hierro (Fe) en el PM_{10} de Lima con casos de enfermedad de Alzheimer registrados en Lima, ampliando el conocimiento de los efectos sistémicos del material particulado más

allá de la esfera respiratoria (85). Los factores meteorológicos (inversión térmica, baja velocidad del viento, alta humedad relativa) potencian la acumulación de estos contaminantes durante el invierno austral, configurando el contexto ambiental que los estudios epidemiológicos locales han asociado sistemáticamente con el incremento de la morbilidad respiratoria.

2.3.2. Estado de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana

2.3.2.1. Red de Monitoreo REMCA-SENAMHI

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) opera la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA) en el AMLC, con diez estaciones automáticas en nueve distritos, que registran PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, CO y O₃ de forma horaria y continua. La cobertura de una estación por cada millón de habitantes es insuficiente para una ciudad de la complejidad atmosférica de Lima, limitación que ha sido parcialmente compensada mediante el modelo de estimación satelital de PM_{2.5} a resolución de 1 km² desarrollado por el grupo UPCH-Emory, que integra datos de profundidad óptica de aerosoles (AOD) del satélite MODIS con campos meteorológicos del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) y registros de SENAMHI, , empleando un algoritmo de *random forest* calibrado contra los registros de las estaciones de monitoreo terrestre (86).

Tabla 7. Estaciones de la REMCA-SENAMHI activas en el Área Metropolitana de Lima y Callao

Código	Zona	Distrito	Contaminantes monitoreados
--------	------	----------	----------------------------

PPD	Norte	Puente Piedra	6 contaminantes*
CRB	Norte	Carabayllo	6 contaminantes*
SMP	Norte	San Martín de Porres	6 contaminantes*
SJL	Este	San Juan de Lurigancho	6 contaminantes*
CRS	Este	Ate (Ceres)	6 contaminantes*
PAR	Este	Ate (Parque Ceres)	6 contaminantes*
STA	Este	Santa Anita	6 contaminantes*
VMT	Sur	Villa María del Triunfo	6 contaminantes*
SBJ	Centro	San Borja	6 contaminantes*
CDM	Centro	Jesús María (Campo de Marte)	6 contaminantes*

*Elaboración Propia. Fuente: SENAMHI, Boletín de Vigilancia de la Calidad del Aire, diciembre 2024 (87). * PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO, O₃*

2.3.2.2. Tendencias de PM_{2.5} y PM₁₀ (2010-2024) y Zonas más Contaminadas

Los datos disponibles de la REMCA-SENAMHI y los modelos satelitales permiten caracterizar la evolución temporal y la distribución espacial de la contaminación en Lima. El PM_{2.5} promedio ponderado por población en Lima fue de 21,0 µg/m³ durante el período 2010-2016 (9), con un gradiente claro de concentraciones que crece de oeste a este: Magdalena del Mar registra los menores promedios (16,6 µg/m³) frente a San Juan de Lurigancho (32,3 µg/m³), una diferencia de casi el doble en la exposición media (19). La estacionalidad es marcada: los mayores valores de

PM_{2.5} ocurren entre mayo y septiembre (otoño-invierno), con picos horarios entre las 6:00-10:00 h y las 18:00-23:00 h, correlacionados con las horas punta del tráfico (88). Para el período 2014-2023, Muñoz Vilela et al. (2024) identificaron los años 2016 y 2021 como los de mayor concentración de PM_{2.5}, con valores diarios que oscilaron entre 3,74 y 148 µg/m³ (88).

El Air Quality Life Index (AQLI) de 2023 estima el PM_{2.5} promedio anual de Lima provincia en 27,4 µg/m³, convirtiéndola en la capital latinoamericana más contaminada según ese indicador (10). El informe mundial de calidad del aire de IQAir 2024 posiciona a Lima tercera entre las capitales de América Latina (18,2 µg/m³ de promedio) y reporta que el distrito de Santa María en Ate alcanzó 53,4 µg/m³ en 2024, la concentración anual más alta en toda la región (89). En mayo de 2025, la estación de Santa Anita de SENAMHI registró un pico de 89,7 µg/m³ de PM_{2.5}, superando en un 79% el ECA de 50 µg/m³ para 24 horas, con niveles clasificados como "insalubres" según el INCA (90).

Tabla 8. Concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ por zona geográfica de Lima Metropolitana y comparación con estándares

Zona /	Distritos	PM _{2.5}	PM ₁₀ / máx.	Nivel de
Estándar		promedio	registrado	riesgo
		anual (µg/m ³)	(µg/m ³)	
Lima Este	Ate, Santa Anita,	29,3–35	60–286	Alto
	San Juan de			
	Lurigancho			

Lima Norte	Puente Piedra, Carabayllo, Comas	25–32,3	80–286	Alto
Lima Sur	Villa María del Triunfo, SJM	20–28	50–100	Moderado- Alto
Lima Centro	Cercado de Lima, San Borja	18–22	40–60	Moderado
Lima Costera	Magdalena del Mar, Miraflores	16,6–18	30–50	Moderado- Bajo
ECA Perú (D.S. 003- 2017)	-	25 (anual)	50 (anual)	Referencia legal
OMS AQG 2021	-	5 (anual)	15 (anual)	Referencia de salud

Fuente: Elaboración propia a partir de Tapia et al. (2020) (9), Vu et al. (2021) (19), Cueva Alvarez (2023) (91), SENAMHI (2024) (87) y AQLI (2025) (10).

La distribución espacial del material particulado en Lima Metropolitana exhibe un marcado patrón de segregación geográfica, caracterizado por una gradiente de concentración de oeste a este y de sur a norte. Esta heterogeneidad espacial responde de manera directa a la interacción de tres factores determinantes: la topografía de la cuenca atmosférica de Lima, la dinámica meteorológica local de los vientos superficiales y la localización de los principales focos emisores (83).

En primer lugar, los vientos dominantes en el litoral limeño provienen del sur y suroeste (brisa marina), soplando de forma constante durante todo el año con velocidades medias de 2 a 4 m/s. Esta dinámica de vientos costeros arrastra las masas de aire y los contaminantes atmosféricos generados en el Callao y los distritos del centro y litoral metropolitano (caracterizados por una elevada densidad de tráfico vehicular e industrial) hacia las zonas interiores de la cuenca. A medida que estas masas de aire se desplazan hacia el interior del valle del río Rímac (Lima Este) y el valle del río Chillón (Lima Norte), se topan con el contrafuerte de las laderas andinas y el cordón de cerros periurbanos que rodean la metrópoli. Esta barrera topográfica natural obstruye el flujo de dispersión horizontal del material particulado, induciendo su estancamiento y acumulación en distritos como Ate, Santa Anita, El Agustino, San Juan de Lurigancho, Carabaylo y Puente Piedra (83,91).

En segundo lugar, las condiciones de estabilidad atmosférica invernal exacerban esta concentración de partículas. Durante los meses de mayo a septiembre, la Corriente Fría de Humboldt y la dinámica del anticiclón del Pacífico Sur generan una fuerte capa de inversión térmica a baja altitud (típicamente situada entre los 500 y 800 metros de altura). Esta capa actúa como un "techo térmico" hermético que impide el movimiento vertical del aire y restringe la dispersión vertical de las emisiones. En consecuencia, el $PM_{2.5}$ y PM_{10} quedan atrapados en una capa de mezcla extremadamente delgada cercana al nivel del suelo, provocando que los distritos de Lima Este y Lima Norte reporten concentraciones promedio que duplican y triplican sistemáticamente los valores de los distritos costeros del

suroeste (como Miraflores, San Isidro y Magdalena del Mar), donde la ventilación costera directa mitiga la acumulación de aerosoles (9,19).

Investigaciones sobre la distribución espaciotemporal del $PM_{2.5}$ en Lima utilizando modelado espacial y datos satelitales (86) confirman que las áreas periféricas de Lima Este y Norte operan como sumideros o *hotspots* de contaminación por material particulado secundario (nitratos y sulfatos) y re-levantamiento de polvo vial. En distritos como Carabayllo y Puente Piedra, la baja cobertura de pavimentación vial y la escasa presencia de áreas verdes por habitante (que actúan como barreras de deposición seca) contribuyen a un incremento adicional de la fracción gruesa (PM_{10}), elevando de forma persistente la carga de exposición respiratoria en estas poblaciones con mayores indicadores de vulnerabilidad social y económica (91).

2.3.2.3. Efecto del Confinamiento COVID-19 en la Calidad del Aire

El confinamiento obligatorio decretado en Perú desde el 15 de marzo de 2020 constituyó un experimento natural de gran valor para cuantificar el efecto de la reducción del tráfico sobre la calidad del aire en Lima. Rojas et al. (2021), en *Air Quality, Atmosphere & Health*, compararon las concentraciones de la REMCA-SENAMHI durante el período de confinamiento estricto (16 de marzo al 30 de abril de 2020) frente al período histórico equivalente (2017-2019). Los resultados evidenciaron reducciones estadísticamente significativas del $PM_{2.5}$ (−31% a −43%), del PM_{10} (−40% a −58%) y del NO_2 (−46% a −48%), confirmando el predominio del tráfico vehicular como fuente emisora principal (92). En paralelo, el ozono troposférico (O_3) aumentó entre un 11% y un 170% por la caída del NO_2 , que

normalmente lo destruye en zonas de alto tráfico. Velayarce et al. (2022), mediante imágenes del satélite Sentinel-5P, documentaron reducciones adicionales de NO₂ de entre el 40% y el 60% en 18 zonas de Lima durante las primeras dos semanas del confinamiento (93). Diez Roux et al. (2020) proyectaron que, si los niveles de PM_{2.5} observados durante el confinamiento (17,7 µg/m³ frente a la línea base de 30 µg/m³) se mantuvieran permanentemente mediante políticas de control de emisiones, se evitarían decenas de miles de muertes prematuras en la población mayor de 30 años de Lima (94).

2.3.3. Estudios Epidemiológicos en Lima Metropolitana

2.3.3.1. Series Temporales de PM_{2.5} y Salud Respiratoria

El grupo de investigación de la UPOCH en colaboración con la Universidad de Emory ha generado la serie más completa de estudios epidemiológicos de series temporales sobre los efectos del PM_{2.5} en Lima, utilizando un modelo de estimación de PM_{2.5} a resolución de 1 km² que combina datos AOD de MODIS con campos meteorológicos del ECMWF y estaciones terrestres de SENAMHI (86). Tapia et al. (2020), publicado en el Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, analizó datos de nueve hospitales públicos (2010-2016) con regresión de Poisson, encontrando que por cada incremento de 1 IQR en PM_{2.5} (6 µg/m³) las visitas a emergencias respiratorias aumentaban en un 4% (IC 95%: 0-5%) (8). Los distritos con mayor pobreza mostraron asociaciones significativamente más fuertes, y el uso de PM_{2.5} global de Lima en lugar de estimaciones distritales subestimaba los efectos en un 24-42%.

En cuanto a la mortalidad, Tapia et al. (2020) analizaron 86 970 muertes cardiorrespiratorias en Lima (2010-2016): por cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$, la mortalidad cardiorrespiratoria aumentó en un 2.9% (RR: 1,029; IC 95%: 1,005-1,052), y en adultos mayores de 65 años, que concentran el 74% de los fallecimientos, el efecto fue de RR: 1,048 (IC 95%: 1,005-1,093) (9). Los autores señalaron explícitamente que los ECA peruanos para $\text{PM}_{2.5}$ son probablemente demasiado permisivos, pues los efectos se observaron a concentraciones medias de 21,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, muy por debajo del ECA de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas. Para la salud de la población pediátrica, Davila Cordova et al. (2020) evaluaron 498 centros de salud del MINSA (2011-2015) con un modelo binomial negativo de series semanales en niños menores de cinco años. Encontraron que, por cada incremento del IQR de $\text{PM}_{2.5}$, las consultas por neumonía aumentaron en un 16-19%, las por IRAB en un 6% y las por bronquiolitis/asma en un 10% (18), efectos significativos en todos los grupos etarios pediátricos.

2.3.3.2. Asma en Lima Metropolitana

Vu et al. (2021) condujeron el primer estudio de series temporales de asma en un país de ingresos bajos y medios con estimaciones satelitales de $\text{PM}_{2.5}$, incluyendo un análisis específico de 103 974 visitas a emergencias por asma en 39 distritos de Lima (2010-2016) (19). Cada incremento de 1 IQR en $\text{PM}_{2.5}$ (6,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se asoció con un aumento del 3,7% en las visitas por asma (IC 95%: 1,7-5,8%), con efectos más pronunciados en menores de 18 años (+4,5%; IC 95%: 2,2-6,8%). La prevalencia de asma en Lima se estima en 13-19,6% en niños y adolescentes, constituyendo una carga asmática de las más altas de América Latina. En una perspectiva longitudinal complementaria, Hansel et al. (2019), en *Annals of the*

American Thoracic Society, siguieron a 484 niños con asma (9-19 años) durante seis a nueve meses en Lima: en modelos multicontaminante, el PM_{2.5} incrementó en un 59% los *odds* de asma no controlada (IC 95%: 1,1-2,4), el NO₂ en un 34%, y el carbón negro mostró efecto independiente (21). El 67% de estos niños tenía asma moderada a severa persistente, con repercusiones en ausentismo escolar y calidad de vida.

2.3.3.3. Modificación por Temperatura y COVID-19 y Calidad del Aire

Steenland et al. (2022) demostraron que la temperatura actúa como modificador del efecto del PM_{2.5} sobre la mortalidad cardiorrespiratoria en Lima. En días con temperatura máxima superior a la mediana local, el RR ascendía a razón de 1,14 por cada 10 µg/m³ de PM_{2.5} (IC 95%: 1,05-1,25), significativamente mayor al observado en días más frescos (20). Esta sinergia entre el PM_{2.5} y calor anticipa que el calentamiento global podría amplificar el impacto en el sistema sanitario del material particulado en Lima en las próximas décadas. Por su parte, Vasquez-Apestegui et al. (2021) evidenciaron en un estudio ecológico en 24 distritos de Lima que la exposición previa acumulada a PM_{2.5} (2010-2016) se asoció significativamente con la incidencia (β : 0,07; IC 95%: 0,034-0,107) y la mortalidad por COVID-19 (β : 0,0014; IC 95%: 0,0006-0,0023) en 2020, sugiriendo que el daño crónico acumulado en el epitelio respiratorio incrementa la vulnerabilidad ante infecciones virales graves (95).

2.3.3.4. Cuadro de Evidencia Bibliográfica: Principales Estudios Epidemiológicos en Lima

Tabla 9. Síntesis de la evidencia epidemiológica sobre PM_{2.5}/PM₁₀ y salud respiratoria en Lima Metropolitana

Referencia	Diseño	Período / Muestra	Exposición	Outcome	Resultado clave
Tapia et al., 2020 (8)	Serie temporal, Poisson	2010-2016; 9 hospitalizaciones	PM _{2.5} distrital	Visitas emergencia respiratoria	+4% por IQR (6 µg/m ³)
Tapia et al., 2020 (9)	Serie temporal, Poisson	2010-2016; 86,970 muertes	PM _{2.5} distrital	Mortalidad cardiorrespiratoria	RR 1,029/10 µg/m ³ ; RR 1,048 en >65 años
Davila Cordova et al., 2020 (18)	Serie temporal, binomial neg.	2011-2015; 498 clínicas MINS A	PM _{2.5} semanal	Consultas pediátricas (<5 años)	+16-19% neumonía; +6% IRAB

Vu et al., 2021 (19)	Serie temporal, Poisson	2010-2016; 103 974 visitas	PM _{2.5} satelital	Visitas emergencia asma	+3,7% total; +4,5% en <18 años
Steenland et al., 2022 (20)	Series temporales, interacción	2010-2016	PM _{2.5} × temperatura máxima	Mortalidad cardiorrespiratoria	RR 1,14 en días T > mediana
Hansel et al., 2019 (21)	Cohorte prospectiva	484 niños 9-19 años, 6-9 meses	PM _{2.5} , NO ₂ , BC	Control del asma, QoL	+59% odds asma no controlada/I QR PM _{2.5}
Vasquez-Apestegui et al., 2021 (95)	Ecológico transversal	24 distrito s Lima, 2020	PM _{2.5} previo (2010-2016)	Incidencia/mortalidad COVID-19	β 0,07 casos; β 0,0014 muertes por µg/m ³

Ordoñez- Aquino et al., 2023 (71)	Ecológico retrospectivo	Lima, 2020- 2024	Fe en PM ₁₀ (SENAMHI)	Casos Alzheimer (CIE- 10 G30)	Asociación Fe-PM ₁₀ con casos Alzheimer
Gouveia et al., 2024 (96)	Multi- ciudad, 337 ciudades A.L.	2009- 2015	PM _{2.5} mensual	Mortalidad CV y respiratoria	+1,3% CV; +0,9% respiratoria/ 10 µg/m ³
Kephart et al., 2020 (97)	Transversal	617 hogares, 4 ciudades es Perú	PM _{2.5} intradomiciliar	PA, CO exhalado	PM _{2.5} intradomiciliar Lima: 41,1 µg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

2.3.4. Tesis e Investigaciones Locales

La producción de tesis en universidades peruanas constituye un cuerpo complementario de evidencia que aporta un mayor detalle geográfico al análisis de la relación entre contaminación del aire y morbilidad respiratoria en distritos específicos de Lima. Tapara Aguilar (2015), en la Universidad Alas Peruanas, evaluó el PM₁₀ en el AA.HH. Túpac Amaru de Ate, documentando que sus

concentraciones excedían los límites de la OMS en varios días monitoreados y que existía correlación descriptiva con las enfermedades respiratorias (asma, faringitis, infecciones agudas) del centro de salud local (98). En Lima Norte, Grau Bravo (2018), en la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), analizó PM_{10} en el distrito de Independencia durante 2016-2017 con datos del DIGESA y el MINSA, encontrando una correlación de Spearman $r = 0,630$ ($p = 0,028$) entre el PM_{10} promedio mensual ($90,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2016) y los casos de enfermedades respiratorias en niños menores de 10 años (99). La principal fuente de contaminación identificada fue la ladrillera Rex de la Av. Panamericana Norte, en combinación con el tráfico de la vía (99).

También en la UNFV, Cabrera Díaz (2019) estudió el $PM_{2.5}$ en Santa Luzmila (Comas, 2012-2017), encontrando una correlación significativa con la amigdalitis aguda ($r = 0,265$; p significativo), pero sin alcanzar significancia estadística para otras seis enfermedades respiratorias evaluadas, lo que el autor atribuyó en parte a la baja resolución temporal de los datos de $PM_{2.5}$ de DIGESA (100). Chagua Namuche (2022), en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, evaluó la asociación del PM_{10} y $PM_{2.5}$ con IRA en niños menores de cinco años en Jesús María (2017-2019). Encontró que, en otoño e invierno de 2019, la correlación entre $PM_{2.5}$ e IRA alcanzó $r = 0,663$ con un R^2 de 95,63% ($p < 0,01$), con un efecto estacional estadísticamente significativo (101). Cueva Alvarez (2023), en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, analizó 23 713 casos de enfermedades respiratorias agudas en Puente Piedra (2014-2017): el PM_{10} superó el ECA de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en todos los meses del período, con un máximo histórico de $286,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en junio de 2015, y se encontraron correlaciones altas y significativas con bronquitis

aguda ($r = 0,68$; $p = 0,01$) y moderadas con amigdalitis aguda ($r = 0,57$; $p = 0,04$) (91). Finalmente, Muñoz Vilela y Campos Díaz (2024), en la Universidad Peruana Unión, ofrecen el análisis de tendencias más completo de material particulado en el AML para el período 2014-2023, identificando 2016 y 2021 como los años de mayor concentración de PM_{2.5} y confirmando el patrón estacional y los picos horarios asociados al tráfico (88).

Tabla 10. Resumen de tesis e investigaciones locales sobre calidad del aire y morbilidad respiratoria en Lima Metropolitana

Autor / Año	Institución	Distrito / Zona	Contaminante	Población	Hallazgo principal
Tapara Aguilar, 2015 (98)	Univ. Alas Peruanas	Ate (AA.HH. Túpac Amaru)	PM ₁₀	Comunidad	PM ₁₀ > límite OMS varios días; correlación con IRA
Grau Bravo, 2018 (99)	UNFV	Independencia	PM ₁₀	Niños <10 años	$r=0,630$ (2016, $p=0,028$); fuente: ladrillera + tráfico

Cabrera Díaz, 2019 (100)	UNFV	Comas (Sta. Luzmila)	PM _{2.5}	Comunida d	r=0,265 PM _{2.5} - amigdalitis aguda (significativ o)
Chagua Namuch e, 2022 (101)	UNJFSC	Jesús María	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Niños <5 años	r=0,663 PM _{2.5} -IRA otoño- invierno 2019 (p<0,01)
Cueva Alvarez, 2023 (91)	UNMSM	Puente Piedra	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Todas las edades	PM ₁₀ > ECA todos los meses 2014- 2017; r=0,68 PM10- bronquitis
Muñoz Vilela y Campos Díaz,	UPEU	Lima Metropolitan a	PM _{2.5} , PM ₁₀	Población general	Picos 2016 y 2021; tendencia estacional

Fuente: Elaboración propia.

La consistencia de los hallazgos a través de distritos y metodologías heterogéneas,, tanto en Lima Norte (Independencia, Comas, Puente Piedra), Lima Este (Ate) y Lima Centro-Norte (Jesús María), refuerza la conclusión de que la contaminación por PM es un determinante ambiental significativo de la morbilidad respiratoria en Lima Metropolitana, con efectos documentados especialmente en la población pediátrica. Aunque estos estudios comparten limitaciones propias del uso de datos secundarios y diseños ecológicos, sus resultados son consistentes con la evidencia internacional y con los estudios de series temporales de mayor rigor metodológico desarrollados por el grupo UPCH-Emory para Lima, que se describen en la sección anterior. La distribución espacial de los distritos analizados, todos en zonas de alta exposición y elevada densidad poblacional de bajos recursos, ilustra también la dimensión de equidad ambiental del problema: la carga de morbilidad respiratoria es más elevada donde la capacidad de respuesta institucional y el acceso a atención de salud de calidad son menores.

2.3.5. Carga de Enfermedad Respiratoria en Lima

Las infecciones respiratorias agudas son la primera causa de morbilidad en Lima y en el Perú. Las infecciones agudas de las vías respiratorias superiores concentran entre el 20% y el 25% de todas las consultas en el sector público de salud, y las de las vías inferiores suman un 5% adicional; las enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores, como EPOC y asma, aportan el 4% restante (102). En el

primer semestre de 2024, EsSalud registró 966,161 casos de IRA a nivel nacional, de los cuales 271 884 correspondieron a Lima (103). Las IRA son, además, de las primeras causas de mortalidad en el Perú, precediendo a las enfermedades cerebrovasculares y otras enfermedades infecciosas. La DIGESA ha reportado que la contaminación del aire en Lima es responsable de aproximadamente 5 000 casos de bronquitis aguda en niños por año, y, de acuerdo a los artículos revisados en secciones previas, se estima que la exposición a $PM_{2.5}$ se asocia con un incremento de entre el 20% y el 30% en las consultas médicas por enfermedades respiratorias en la capital, especialmente en el Centro Histórico y las zonas industriales.

Las estimaciones de mortalidad prematura atribuible a la contaminación del aire en Lima muestran una variabilidad metodológica importante. La estimación histórica de Steenland calcula alrededor de 2 300 muertes anuales por cardiopatía y enfermedades respiratorias en adultos (20); la Municipalidad de Lima proyecta más de 1 600 muertes prematuras por año (104); y los datos del Air Quality Life Index (AQLI) 2025 y de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos sitúan el total, al incluir causas adicionales de muerte, en torno a 10 000 muertes anuales en Lima y Callao, de las cuales aproximadamente 6 000 serían directamente atribuibles al tráfico vehicular. (10). El Air Quality Life Index (AQLI) 2025 estima que el $PM_{2.5}$ en Lima ($27,4 \mu g/m^3$) produce una pérdida de 2,2 años de esperanza de vida por habitante respecto a un escenario de cumplimiento de la guía anual de la OMS de $5 \mu g/m^3$ (10). Para el Perú en conjunto, la pérdida promedio es de 1,9 años, superior a la pérdida atribuible al tabaco (0,6 años) y a la desnutrición infantil (0,5 años), situando a la contaminación del aire como el principal factor de riesgo ambiental modificable para la longevidad en el país (10). El estudio multi-

ciudad de Gouveia et al. (2024) en 337 ciudades latinoamericanas confirma que por cada 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ adicional de $\text{PM}_{2.5}$ el riesgo de mortalidad cardiovascular aumenta 1,3% y el de mortalidad respiratoria un 0,9%, con efectos más pronunciados en hombres y adultos mayores (96).

Un segmento de la población cuya carga de exposición ha sido sistemáticamente subregistrada en los análisis epidemiológicos es el de los trabajadores que desarrollan sus actividades en la vía pública durante jornadas de 8 a 12 horas continuas. Este grupo comprende, entre otros, a policías de tránsito, barrenderos municipales, conductores de transporte público, repartidores de servicios y estibadores en zonas de carga urbana. A diferencia de la población general, que puede reducir parte de su exposición permaneciendo en interiores, estos trabajadores acumulan dosis de inhalación de $\text{PM}_{2.5}$ e incluso PM_1 directamente sobre las calles de alto flujo vehicular, donde las concentraciones de contaminantes pueden ser entre 2 y 4 veces superiores a las registradas por las estaciones de fondo urbano. El PM_1 , subfracción con alta capacidad de translocación sistémica y asociación documentada con efectos cardiovasculares y potencial carcinogénico, no está regulado en ningún marco normativo vigente, por lo que la exposición de estos trabajadores en avenidas de alto tráfico como la Av. Abancay, la Panamericana Norte o la Carretera Central ocurre en un vacío regulatorio que no es capturado ni por el INCA ni por los ECA del D.S. 003-2017-MINAM. La ausencia de estas poblaciones en los análisis de morbilidad disponibles no equivale a ausencia de daño, equivale a invisibilidad epidemiológica de un grupo con alta probabilidad de exposición acumulada superior a la de cualquier otro segmento de la población limeña.

2.3.5.1. Evidencia de Exposición y Daño Respiratorio en Poblaciones Trabajadoras de Vía Pública en Lima

El vacío epidemiológico en el registro de trabajadores expuestos en la vía pública ha sido parcialmente abordado por investigaciones en el campo de la medicina ocupacional y ambiental en el Perú, las cuales aportan datos concluyentes sobre la dosis de exposición y el consecuente daño a la salud respiratoria de estos grupos vulnerables.

La Policía de Tránsito representa la cohorte ocupacional con mayor tiempo de exposición directa a las emisiones vehiculares en las calles de Lima Metropolitana. El estudio de Mormontoy et al. (105) evaluó el impacto de la exposición al parque automotor en efectivos policiales que laboraban en el control del tránsito en Lima y Callao. Sus resultados documentaron que los policías de tránsito presentaron niveles de plomo en sangre significativamente mayores en comparación con los policías que realizaban labores administrativas de oficina ($44.7 \pm 6.1 \mu\text{g/L}$ frente a $39.3 \pm 8.2 \mu\text{g/L}$; $p=0.0001$), identificándose la función de control de tránsito como un factor de riesgo directo para la acumulación sistémica de contaminantes ($\text{OR}=4.80$) (105). Si bien los niveles de plomo en sangre han mostrado un descenso progresivo tras la eliminación de la gasolina con plomo en el país a finales de 2004, esta investigación sentó un precedente fundamental al demostrar cómo la exposición crónica de 8 a 12 horas diarias en cruces viales congestionados de Lima Centro induce una deposición corporal de contaminantes vehiculares, la cual se asocia con una alta prevalencia de síntomas respiratorios crónicos, faringitis irritativa y patrón espirométrico obstructivo (71).

Del mismo modo, los conductores de transporte público (tanto del sistema masivo formal como taxistas y transportistas informales) acumulan exposiciones diarias promedio de 12 a 16 horas en el interior de las cabinas vehiculares. Tapia et al. (106) evaluaron la exposición a contaminantes del aire en el interior de cabinas de microbuses en rutas metropolitanas de Lima. Los resultados revelaron que la concentración intramuros de $PM_{2.5}$, PM_{10} y monóxido de carbono dentro de las cabinas de los conductores superaba significativamente los estándares recomendados, actuando el vehículo mismo como una cámara de acumulación de los gases emitidos por el escape de las unidades precedentes. Este estudio documentó alteraciones en biomarcadores hematológicos y una prevalencia del 43.5% de síntomas de obstrucción bronquial recurrente en los conductores evaluados, vinculada directamente al tiempo diario de exposición vial y al mantenimiento deficiente de la flota (106).

Por último, el personal dedicado a la limpieza pública y barrido municipal de calles constituye otro colectivo de alta vulnerabilidad. La labor del barrido implica un esfuerzo físico continuo, lo cual incrementa el volumen de ventilación minuto de los trabajadores. Al realizar esta tarea directamente sobre la calzada y las bermas de avenidas principales, estos trabajadores inhalan de manera directa el polvo vial suspendido por el tráfico continuo, el cual contiene no solo material particulado inorgánico grueso, sino metales pesados desprendidos de los frenos y neumáticos, así como sílice cristalina. Alania Armas (107) evaluó los factores de riesgo en la salud del personal de limpieza pública en el distrito de Carabayllo, documentando que las condiciones de exposición ocupacional al aire libre sin la dotación y uso consistente de equipos de protección personal (EPP) se asociaban

significativamente con una elevada prevalencia de rinitis (46%), neumonía (41%) e influenza (40%), confirmando que el barrido y la limpieza manual en calles altamente expuestas representa un factor determinante en la carga global de morbilidad respiratoria urbana y de origen laboral (107).

2.3.6. Análisis Crítico

2.3.6.1. Brecha entre la Ciencia y la Normativa Vigente

El análisis integrado de los tres portafolios permite identificar una brecha sustancial entre el conocimiento científico y el marco normativo peruano. El Portafolio 1 sistematizó la evidencia global sobre los mecanismos fisiopatológicos del PM_{2.5} (como la generación de especies reactivas de oxígeno, la activación de NF-κB y la disfunción endotelial) y los efectos documentados sobre asma, EPOC, neumonía y cáncer de pulmón. El Portafolio 2 describió el marco normativo nacional y su distancia respecto a los estándares internacionales. El presente portafolio demuestra que esos efectos globalmente documentados ocurren en Lima a concentraciones que frecuentemente se mantienen por debajo del ECA peruano, pero muy por encima de los umbrales de la OMS (1,11).

El ECA para PM_{2.5} de 24 horas en el Perú (50 µg/m³, D.S. 003-2017-MINAM) duplica la guía de la OMS 2021 (15 µg/m³), y el ECA anual (25 µg/m³) quintuplica la guía anual de la OMS (5 µg/m³). Tapia et al. (2020) demostraron que la mortalidad cardiorrespiratoria en Lima aumenta significativamente a partir de un PM_{2.5} promedio de 21,0 µg/m³, por debajo del propio ECA diario, pero más de cuatro veces la guía anual de la OMS (9). En otras palabras, los niveles de PM_{2.5} que el ordenamiento jurídico considera "aceptables" se asocian con incrementos

documentados en mortalidad y morbilidad. La EPA de EE. UU. redujo en 2024 su estándar anual para $PM_{2.5}$ a $9 \mu g/m^3$ sustentándose en evidencia similar, la Unión Europea avanza en la misma dirección y los países latinoamericanos vecinos siguen esta tendencia. El Perú permanece anclado en estándares de 2017 que no han sido revisados pese a la actualización de las guías de la OMS en 2021 y a la disponibilidad de evidencia local que demuestra el daño que podría ocasionar.

2.3.6.2. Comparación con Otras Ciudades de América Latina y Limitaciones de la Evidencia Local

Lima se sitúa entre las capitales latinoamericanas más contaminadas, ocupa el tercer lugar en el reporte IQAir 2024 ($18,2 \mu g/m^3$), con el distrito de Ate encabezando el ranking regional con $53,4 \mu g/m^3$ en 2024, mientras que ciudades como Bogotá, Buenos Aires y Santiago han avanzado más en la modernización de sus flotas vehiculares, la implementación de zonas de bajas emisiones y la reducción documentada de $PM_{2.5}$ en las últimas décadas. El estudio multi-ciudad de Gouveia et al. (2024) contextualiza a Lima dentro de un patrón latinoamericano de efectos de corto plazo del $PM_{2.5}$ sobre la mortalidad, con magnitudes de efecto similares a las estimadas localmente (96).

Pese a la fortaleza metodológica relativa de los estudios de series temporales desarrollados por el grupo UPCH-Emory, la evidencia epidemiológica local aún presenta limitaciones estructurales que deben ser consideradas al interpretar sus hallazgos. Una primera limitación es que los estudios de mayor calidad disponibles se concentran principalmente en el período 2010-2016, lo que restringe la evaluación de la evolución reciente de la exposición y de sus efectos sobre la salud

respiratoria en un contexto de cambios ambientales, normativos y demográficos. Una segunda limitación radica en que la red de monitoreo, compuesta por 10 estaciones para toda Lima Metropolitana, sigue siendo insuficiente para captar con precisión la heterogeneidad espacial de la exposición. Esto puede generar errores de clasificación que, en términos epidemiológicos, tenderían a subestimar la magnitud real de las asociaciones observadas. A ello se suma la ausencia de cohortes prospectivas de largo plazo que permitan analizar con mayor solidez la incidencia y progresión de enfermedades respiratorias crónicas, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica o el cáncer de pulmón, cuya relación con la contaminación atmosférica exige seguimientos prolongados y estimaciones individuales de exposición.

De manera complementaria, una parte importante de la evidencia procedente de tesis e investigaciones locales se basa en datos secundarios con limitada resolución temporal y escaso control de variables de confusión relevantes, como temperatura, humedad, estacionalidad, tabaquismo u otras exposiciones. Los datos provenientes del sector privado de salud, además, continúan escasamente incorporados en los análisis de morbilidad. Esto reduce la representatividad del panorama epidemiológico y podría invisibilizar una fracción no menor de la carga real de enfermedad respiratoria atribuible a la contaminación del aire en Lima Metropolitana.

III. CONCLUSIONES

La evidencia revisada en este trabajo muestra de manera consistente que la exposición al material particulado fino $PM_{2.5}$, así como a PM_{10} , dióxido de nitrógeno y ozono, se asocia con incrementos significativos de la morbilidad y

mortalidad respiratoria en Lima Metropolitana. Los estudios de series temporales desarrollados por el grupo UPOCH-Emory entre 2010 y 2016 constituyen el cuerpo de evidencia local más sólido disponible. Sus hallazgos indican que cada incremento de un rango intercuartílico en $PM_{2.5}$, equivalente a $6 \mu g/m^3$, se asoció con un aumento del 4% en visitas a emergencias respiratorias, del 3,7% en atenciones por asma y de entre 16% y 19% en consultas pediátricas por neumonía. La mortalidad cardiorrespiratoria aumentó 2,9% por cada $10 \mu g/m^3$ adicionales de $PM_{2.5}$, con efectos más pronunciados en adultos mayores de 65 años (RR 1,048). Estos efectos se observaron a concentraciones medias de $21,0 \mu g/m^3$, muy por debajo del ECA peruano vigente para 24 horas ($50 \mu g/m^3$), lo que indica que la norma nacional no protege adecuadamente a la población.

La fisiopatología se encuentra bien caracterizada. El $PM_{2.5}$ genera estrés oxidativo mediante la producción de especies reactivas de oxígeno, activa los factores de transcripción NF- κ B y el receptor de aril-hidrocarburo (AhR), e induce una cascada inflamatoria que puede progresar desde exacerbaciones agudas del asma hasta remodelación tisular, fibrosis en enfermedad pulmonar obstructiva crónica avanzada y desarrollo de neoplasias. La activación de la vía AhR por los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en el material particulado permite explicar tanto la carcinogénesis pulmonar como la mayor gravedad de COVID-19 descrita en la literatura revisada. Se trata de manifestaciones distintas de una misma alteración molecular, dependiente de la intensidad, duración y composición de la exposición.

La normativa peruana vigente muestra un retraso significativo respecto de la evidencia científica internacional. El D.S. N.º 003-2017-MINAM fijó el ECA anual

para PM_{2.5} en 25 µg/m³, valor equivalente al objetivo intermedio IT-2 de las directrices OMS de 2005, mientras que las Air Quality Guidelines de la OMS 2021 reducen ese umbral a 5 µg/m³. El ECA peruano anual para NO₂, establecido en 100 µg/m³, es diez veces más permisivo que la guía OMS 2021 de 10 µg/m³. Esta brecha implica que el Estado cumple formalmente con su propia norma, mientras una proporción considerable de la población permanece expuesta a concentraciones que la evidencia considera dañinas. A diferencia de Colombia, Chile y México, que han actualizado o escalonado sus estándares en años recientes, el Perú no ha emitido ninguna revisión de los ECA para PM_{2.5}, PM₁₀ o NO₂ desde 2017 ni ha publicado un calendario vinculante de metas progresivas.

El sistema de monitoreo e información presenta fortalezas importantes, pero sufre de un problema de cobertura insuficiente fuera de Lima y Callao, acreditación incompleta ante INACAL y escasa integración con los sistemas de información del MINSA y otras entidades. La vigilancia epidemiológica del CDC Perú reporta IRA de forma agregada sin estratificación por exposición ambiental distrital, lo que impide realizar análisis de dosis-respuesta. La mayor parte de la evidencia local disponible proviene de tesis con limitada resolución temporal y control de confusores, y los datos del sector privado de salud permanecen en gran medida ausentes del análisis epidemiológico.

La distribución espacial del problema añade una dimensión de equidad que no puede ignorarse, pues la carga de morbilidad respiratoria es más elevada en zonas periurbanas de Lima Norte y Lima Este, donde el acceso a atención de salud de calidad es menor y la capacidad de respuesta institucional es más débil. El Air Quality Life Index 2025 estima que el PM_{2.5} en Lima (27,4 µg/m³) genera una

pérdida de 2,2 años de esperanza de vida por habitante respecto a un escenario de cumplimiento de las directrices de la OMS, una carga superior a la atribuible al tabaco (0,6 años) y a la desnutrición infantil (0,5 años) en el país.

IV. RECOMENDACIONES

Establecimiento de un cronograma obligatorio de convergencia para los ECA:

El Ministerio del Ambiente debe iniciar la revisión del Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM, incorporando de manera vinculante e improrrogable un calendario de convergencia progresiva hacia las Directrices de Calidad de Aire de la OMS de 2021. Se propone establecer como meta al 2030 el estándar de PM_{2.5} anual en 10 µg/m³ (Objetivo Intermedio IT-4 de la OMS) y de 15 µg/m³ anuales para el PM₁₀. Asimismo, se debe reformar la gobernanza ambiental para que las actualizaciones periódicas de los ECA cuenten con el aval técnico vinculante y poder de veto del Ministerio de Salud en resguardo de la salud colectiva, evitando flexibilizaciones normativas basadas en intereses de competitividad industrial como las ocurridas históricamente con el SO₂.

Focalización espacial de la red de monitoreo y alerta temprana en zonas

críticas: El SENAMHI, en coordinación con el MINAM y los Gobiernos Locales, debe priorizar la densificación de la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire en los distritos clasificados como *hotspots* atmosféricos en Lima Este (Ate, Santa Anita, San Juan de Lurigancho) y Lima Norte (Puente Piedra, Carabayllo). Estas estaciones de monitoreo deben complementarse con redes locales de sensores de bajo costo calibrados para caracterizar la exposición en microambientes y áreas periurbanas de ladera. Los planes de contingencia ante eventos de mala calidad del aire del INCA deben incorporar alertas territorializadas automáticas dirigidas a los

centros educativos y postas médicas de estas zonas críticas para prevenir exacerbaciones agudas de asma y neumonías infantiles.

Programa metropolitano de salud ocupacional para trabajadores de la vía pública: El MINSA, el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo y la Superintendencia Nacional de Fiscalización Laboral deben diseñar e implementar una norma técnica obligatoria de vigilancia de salud ocupacional para los trabajadores expuestos en la vía pública de Lima Metropolitana (policías de tránsito, personal de limpieza pública, conductores de transporte público, repartidores y vendedores ambulantes). Este programa debe exigir a las entidades empleadoras (públicas y privadas) la implementación de rotación de turnos y reducción de horas de jornada laboral continua en avenidas saturadas, dotación obligatoria de equipos de protección respiratoria con filtros de alta eficiencia (N95 o superior), exámenes médicos periódicos anuales con espirometrías obligatorias, y el reconocimiento de las enfermedades respiratorias crónicas obstructivas en este grupo ocupacional como enfermedades profesionales.

Control sostenido de emisiones y calidad del combustible: El MINEM y el MTC deben acelerar la prohibición del ingreso y circulación de vehículos diésel de transporte público con más de 10 años de antigüedad en el Área Metropolitana de Lima y Callao. De manera paralela, resulta importante establecer incentivos fiscales para la transición hacia flotas eléctricas y de gas natural vehicular, y fiscalizar el cumplimiento estricto del límite máximo de 10 ppm de azufre en los combustibles comercializados por refinerías nacionales, superando las prórrogas que dilatan los estándares tecnológicos de refinación limpia.

Estudios de cohorte en poblaciones ocupacionales vulnerables: Promover el desarrollo de estudios de cohorte prospectivos y de larga duración, orientados a evaluar la incidencia de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), asma ocupacionalmente agravado, deterioro de la función pulmonar y marcadores de daño oxidativo en la Policía de Tránsito de Lima y trabajadores municipales de limpieza pública, permitiendo determinar la relación dosis-respuesta ante exposiciones reales en el entorno vial urbano.

Incorporación de la fracción ultrafina (UFP) y PM₁ en la vigilancia científica: Fomentar la investigación universitaria y académica en Lima sobre las concentraciones superficiales y patrones de deposición respiratoria de las fracciones submicrónicas (PM₁) y partículas ultrafinas (PM_{0.1}), las cuales escapan al control de los ECA vigentes pero poseen un elevado potencial de translocación sistémica y daño multiorgánico.

Análisis de Impacto en Salud por Intervenciones Regulatorias: Desarrollar modelos de Evaluación de Impacto en Salud para proyectar la reducción en la morbilidad por neumonía infantil, asma pediátrico y mortalidad cardiorrespiratoria en adultos que se obtendría en Lima ante diferentes escenarios de reducción progresiva de la contaminación atmosférica, aportando evidencia costo-beneficio para sustentar técnicamente las futuras propuestas de actualización de los ECA.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [Internet]. World Health Organization; 2021. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
2. Fang T, Di Y, Xu Y, Shen N, Fan H, Hou S, et al. Temporal trends of particulate matter pollution and its health burden, 1990–2021, with projections to 2036: a systematic analysis for the global burden of disease study 2021. *Front Public Health*. 2025;13:1579716.
3. Thangavel P, Park D, Lee YC. Recent insights into particulate matter (PM_{2.5})-mediated toxicity in humans: an overview. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(12):7511.
4. Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Front Public Health*. 2020;8:14.
5. Lim EY, Kim GD. Particulate matter-induced emerging health effects associated with oxidative stress and inflammation. *Antioxidants*. 2024;13(10):1256.
6. Li T, Yu Y, Sun Z, Duan J. A comprehensive understanding of ambient particulate matter and its components on the adverse health effects based from epidemiological and laboratory evidence. *Part Fibre Toxicol*. 29 de noviembre de 2022;19(1):67. doi:10.1186/s12989-022-00507-5
7. Huang S, Li H, Wang M, Qian Y, Steenland K, Caudle WM, et al. Long-term exposure to nitrogen dioxide and mortality: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ*. 2021;776:145968.
8. Tapia V, Steenland K, Sarnat SE, 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*. 2020;30(4):680–8.
9. Tapia V, Steenland K, Vu B, Liu Y, Vásquez V, Gonzales GF. PM_{2.5} exposure on daily cardio-respiratory mortality in Lima, Peru, from 2010 to 2016. *Environ Health*. diciembre de 2020;19(1):63. doi:10.1186/s12940-020-00618-6
10. Michael Greenstone, Tanushree Ganguly, Christa Hasenkopf, Nishka Sharma, Hrishikesh Chandra Gautam. Air Quality Life Index - Annual Update 2025 [Internet]. University of Chicago; 2025. Disponible en: <https://aqli.epic.uchicago.edu/files/Report%20-%20English%20Global%20View.pdf>
11. Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen

- Disposiciones Complementarias. [Internet]. 2017. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3670-003-2017-minam>
12. Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N.º 010-2019-MINAM, Aprobación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire [Internet]. 2019. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/363557-10-2019-minam>
 13. Ministerio del Ambiente. Resolución Ministerial N.º 181-2016-MINAM, Establecen el Índice de Calidad del Aire - INCA y crean el Sistema de Información de Calidad del Aire - INFO AIRE PERÚ [Internet]. 2016. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/318191-181-2016-minam>
 14. Ministerio del Ambiente. Resolución Ministerial N.º 142-2021-MINAM, Aprueban el Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad de Aire de Lima y Callao 2021-2025 [Internet]. 2021. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2045939-142-2021-minam>
 15. Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N.º 023-2021-MINAM, Aprueban la Política Nacional del Ambiente al 2030 [Internet]. 2021. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2036880-023-2021-minam>
 16. Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N.º 0011-2023-MINAM, Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de aire de los parámetros cadmio, arsénico y cromo en material particulado menor a diez micras (PM10) [Internet]. 2023. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/4880911-0011-2023-minam>
 17. Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N.º 017-2025-MINAM, Decreto Supremo que establece medidas para operativizar la gestión de la calidad del aire [Internet]. 2025. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/7241204-017-2025-minam>
 18. Davila Cordova JE, Tapia Aguirre V, Vasquez Apestegui V, Ordoñez Ibarguen L, Vu BN, Steenland K, et al. Association of PM2.5 concentration with health center outpatient visits for respiratory diseases of children under 5 years old in Lima, Peru. *Environ Health*. diciembre de 2020;19(1):7. doi:10.1186/s12940-020-0564-5
 19. Vu BN, Tapia V, Ebelt S, Gonzales GF, Liu Y, Steenland K. The association between asthma emergency department visits and satellite-derived PM2. 5 in Lima, Peru. *Environ Res*. 2021;199:111226.
 20. Steenland K, Vu B, Scovronick N. Effect modification by maximum temperature of the association between PM2. 5 and short-term cardiorespiratory

- mortality and emergency room visits in Lima, Peru, 2010–2016. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2022;32(4):590–5.
21. Hansel NN, Romero KM, Pollard SL, Bose S, Psoter KJ, J. Underhill L, et al. Ambient air pollution and variation in multiple domains of asthma morbidity among Peruvian children. *Ann Am Thorac Soc*. 2019;16(3):348–55.
 22. Vilcins D, Christofferson RC, Yoon JH, Nazli SN, Sly PD, Cormier SA, et al. Updates in air pollution: current research and future challenges. *Ann Glob Health*. 2024;90(1):9.
 23. Liu J, He C, Si Y, Li B, Wu Q, Ni J, et al. Toward Better and Healthier Air Quality: Global PM_{2.5} and O₃ Pollution Status and Risk Assessment Based on the New WHO Air Quality Guidelines for 2021. *Glob Chall*. abril de 2024;8(4):2300258. doi:10.1002/gch2.202300258
 24. He C, Liu J, Zhou Y, Zhou J, Zhang L, Wang Y, et al. Synergistic PM_{2.5} and O₃ control to address the emerging global PM_{2.5}-O₃ compound pollution challenges. *Eco-Environ Health*. septiembre de 2024;3(3):325–37. doi:10.1016/j.eehl.2024.04.004
 25. Wei J, Li Z, Lyapustin A, Wang J, Dubovik O, Schwartz J, et al. First close insight into global daily gapless 1 km PM_{2.5} pollution, variability, and health impact. *Nat Commun*. 15 de diciembre de 2023;14(1):8349. doi:10.1038/s41467-023-43862-3
 26. Southerland VA, Brauer M, Mohegh A, Hammer MS, Van Donkelaar A, Martin RV, et al. Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets. *Lancet Planet Health*. febrero de 2022;6(2):e139–46. doi:10.1016/S2542-5196(21)00350-8
 27. Azimi MN, Rahman MM. Unveiling the health consequences of air pollution in the world's most polluted nations. *Sci Rep*. 29 de abril de 2024;14(1):9856. doi:10.1038/s41598-024-60786-0
 28. Kodros JK, Volckens J, Jathar SH, Pierce JR. Ambient Particulate Matter Size Distributions Drive Regional and Global Variability in Particle Deposition in the Respiratory Tract. *GeoHealth*. octubre de 2018;2(10):298–312. doi:10.1029/2018GH000145
 29. Li D, Li Y, Li G, Zhang Y, Li J, Chen H. Fluorescent reconstitution on deposition of PM_{2.5} in lung and extrapulmonary organs. *Proc Natl Acad Sci*. 12 de febrero de 2019;116(7):2488–93. doi:10.1073/pnas.1818134116
 30. Chang JH, Lee YL, Chang LT, Chang TY, Hsiao TC, Chung KF, et al. Climate change, air quality, and respiratory health: a focus on particle deposition in the lungs. *Ann Med*. 12 de diciembre de 2023;55(2):2264881. doi:10.1080/07853890.2023.2264881

31. Sun H, Chen X, Huang W, Wei J, Yang X, Shan A, et al. Association between Long-Term Exposure to PM_{2.5} Inorganic Chemical Compositions and Cardiopulmonary Mortality: A 22-Year Cohort Study in Northern China. *Environ Health*. 16 de agosto de 2024;2(8):530–40. doi:10.1021/envhealth.4c00020
32. Pardo M, Qiu X, Zimmermann R, Rudich Y. Particulate Matter Toxicity Is Nrf2 and Mitochondria Dependent: The Roles of Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Chem Res Toxicol*. 18 de mayo de 2020;33(5):1110–20. doi:10.1021/acs.chemrestox.0c00007
33. Chowdhury S, Pillarisetti A, Oberholzer A, Jetter J, Mitchell J, Cappuccilli E, et al. A global review of the state of the evidence of household air pollution's contribution to ambient fine particulate matter and their related health impacts. *Environ Int*. marzo de 2023;173:107835. doi:10.1016/j.envint.2023.107835
34. Zhang R, Johnson NM, Li Y. Establishing the exposure–outcome relation between airborne particulate matter and children's health. *Thorax*. abril de 2022;77(4):322–3. doi:10.1136/thoraxjnl-2021-217915
35. Sierra-Vargas MP, Montero-Vargas JM, Debray-García Y, Vizuet-de-Rueda JC, Loaeza-Román A, Terán LM. Oxidative Stress and Air Pollution: Its Impact on Chronic Respiratory Diseases. *Int J Mol Sci*. 3 de enero de 2023;24(1):853. doi:10.3390/ijms24010853
36. Kayalar Ö, Rajabi H, Konyalilar N, Mortazavi D, Aksoy GT, Wang J, et al. Impact of particulate air pollution on airway injury and epithelial plasticity; underlying mechanisms. *Front Immunol*. 8 de marzo de 2024;15:1324552. doi:10.3389/fimmu.2024.1324552
37. Kim JH, Woo HD, Lee JJ, Song DS, Lee K. Association between short-term exposure to ambient air pollutants and biomarkers indicative of inflammation and oxidative stress: a cross-sectional study using KoGES-HEXA data. *Environ Health Prev Med*. 2024;29(0):17–17. doi:10.1265/ehpm.23-00199
38. Russo RC, Togbe D, Couillin I, Segueni N, Han L, Quesniaux VFJ, et al. Ozone-induced lung injury and inflammation: Pathways and therapeutic targets for pulmonary diseases caused by air pollutants. *Environ Int*. abril de 2025;198:109391. doi:10.1016/j.envint.2025.109391
39. Ji H, Brown AP, Henson SN, Haczku A. The “epiTet” of Air Pollution: Epigenetic Regulation of Airway Inflammation by Tet1. *Int Arch Allergy Immunol*. 2023;184(9):949–52. doi:10.1159/000530272
40. Lee PH, Park S, Lee YG, Choi SM, An MH, Jang AS. The Impact of Environmental Pollutants on Barrier Dysfunction in Respiratory Disease. *Allergy Asthma Immunol Res*. 2021;13(6):850. doi:10.4168/aaair.2021.13.6.850

41. Wallbanks S, Griffiths B, Thomas M, Price OJ, Sylvester KP. Impact of environmental air pollution on respiratory health and function. *Physiol Rep.* agosto de 2024;12(16):e70006. doi:10.14814/phy2.70006
42. Wu X, Lin L, Yan H, Zheng F, Ding Y, Yao H. Exposure to environmental xenobiotics and lung tissue function: A comprehensive review on biological mechanisms and pathways. *Ecotoxicol Environ Saf.* diciembre de 2025;308:119438. doi:10.1016/j.ecoenv.2025.119438
43. Liu Y, Wang T, Dong Y ang, Zhang J. Exploring the interplay between oxidative stress and autophagy in asthma: Pathophysiology and therapeutic potential. *Allergol Immunopathol (Madr).* 1 de mayo de 2025;53(3):167–80. doi:10.15586/aei.v53i3.1217
44. Behinaein P, Hutchings H, Knapp T, Okereke IC. The growing impact of air quality on lung-related illness: a narrative review. *J Thorac Dis.* septiembre de 2023;15(9):5055–63. doi:10.21037/jtd-23-544
45. Huang, J, Yang, X, Fan F, Hu, Y, Wang, X, Zhu, S, et al. Outdoor air pollution and the risk of asthma exacerbations in single lag0 and lag1 exposure patterns: a systematic review and meta-analysis. *J Asthma.* 2 de noviembre de 2022;59(11):2322–39. doi:10.1080/02770903.2021.2008429
46. Bi J, D’Souza RR, Moss S, Senthilkumar N, Russell AG, Scovronick NC, et al. Acute Effects of Ambient Air Pollution on Asthma Emergency Department Visits in Ten U.S. States. *Environ Health Perspect.* abril de 2023;131(4):047003. doi:10.1289/EHP11661
47. Hoffmann C, Maglakelidze M, Von Schneidemesser E, Witt C, Hoffmann P, Butler T. Asthma and COPD exacerbation in relation to outdoor air pollution in the metropolitan area of Berlin, Germany. *Respir Res.* diciembre de 2022;23(1):64. doi:10.1186/s12931-022-01983-1
48. Hu Y, Wu M, Li Y, Liu X. Influence of PM1 exposure on total and cause-specific respiratory diseases: a systematic review and meta-analysis. *Environ Sci Pollut Res.* febrero de 2022;29(10):15117–26. doi:10.1007/s11356-021-16536-0
49. Chen L, Cai M, Li H, Wang X, Tian F, Wu Y, et al. Risk/benefit tradeoff of habitual physical activity and air pollution on chronic pulmonary obstructive disease: findings from a large prospective cohort study. *BMC Med.* 28 de febrero de 2022;20(1):70. doi:10.1186/s12916-022-02274-8
50. Ronaldson A, Arias De La Torre J, Ashworth M, Hansell AL, Hotopf M, Mudway I, et al. Associations between air pollution and multimorbidity in the UK Biobank: A cross-sectional study. *Front Public Health.* 2 de diciembre de 2022;10:1035415. doi:10.3389/fpubh.2022.1035415

51. Li N, Ma J, Ji K, Wang L. Association of PM_{2.5} and PM₁₀ with Acute Exacerbation of Chronic Obstructive Pulmonary Disease at lag₀ to lag₇: A Systematic Review and Meta-Analysis. *COPD J Chronic Obstr Pulm Dis*. 31 de diciembre de 2022;19(1):243–54. doi:10.1080/15412555.2022.2070062
52. Delavar MA, Jahani MA, Sepidarkish M, Alidoost S, Mehdinezhad H, Farhadi Z. Relationship between fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration and risk of hospitalization due to chronic obstructive pulmonary disease: a systematic review and meta-analysis. *BMC Public Health*. 13 de noviembre de 2023;23(1):2229. doi:10.1186/s12889-023-17093-6
53. Aglan A, Synn AJ, Nurhussien L, Chen K, Scheerens C, Koutrakis P, et al. Personal and community-level exposure to air pollution and daily changes in respiratory symptoms and oxygen saturation among adults with COPD. *Hyg Environ Health Adv*. junio de 2023;6:100052. doi:10.1016/j.heha.2023.100052
54. Monoson A, Schott E, Ard K, Kilburg-Basnyat B, Tighe RM, Pannu S, et al. Air pollution and respiratory infections: the past, present, and future. *Toxicol Sci*. 20 de marzo de 2023;192(1):3–14. doi:10.1093/toxsci/kfad003
55. Wu Y, Song P, Lin S, Peng L, Li Y, Deng Y, et al. Global Burden of Respiratory Diseases Attributable to Ambient Particulate Matter Pollution: Findings From the Global Burden of Disease Study 2019. *Front Public Health*. 23 de noviembre de 2021;9:740800. doi:10.3389/fpubh.2021.740800
56. Zhang J, Lim YH, So R, Yu Z, Tuffier S, Bergmann M, et al. Long-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Lower Respiratory Tract Infection in Adults: Danish Nationwide Evidence. *Ann Am Thorac Soc*. 1 de septiembre de 2025;22(9):1305–13. doi:10.1513/AnnalsATS.202501-087OC
57. Murtas R, Schiattarella P, Smimmo A, Perilli A, Stanisci I, Bonvicini L, et al. Short-term and long-term effects of air pollution on acute lower respiratory infections incidence and mortality: an overview and critical appraisal of systematic reviews. *Eur Respir Rev*. octubre de 2025;34(178):250129. doi:10.1183/16000617.0129-2025
58. King C, Surace AE, Jeffers G, Hawcutt D, Sinha I. The effects of ambient air pollution on the risk of hospitalisation with acute respiratory illnesses in children: an overview of systematic reviews. En: *Occupational and environmental health* [Internet]. European Respiratory Society; 2019. p. PA2834. Disponible en: <https://publications.ersnet.org/lookup/doi/10.1183/13993003.congress-2019.PA2834> doi:10.1183/13993003.congress-2019.PA2834
59. Organization WH. Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. *IARC Sci Publ*. 2013;161:1–177.
60. Krasnov G, Gizatullina A, Tastaibek T, Mansharipova A, Mukhamediyev R, Symagulov A. AIR POLLUTION AND CANCER RISKS: A REVIEW OF

META-ANALYSES. *Oncol Radiol Kazakhstan*. 30 de junio de 2025;76(2):103–8. doi:10.52532/2521-6414-2025-2-76-440

61. Kim NE, Lee JY, Lee GY, Lee CY, Park S, Ryu YJ, et al. Long-term exposure to fine particulate matter, ozone, and greenness and the risk of lung cancer: a retrospective cohort analysis within a national sample cohort. *Front Public Health*. 30 de septiembre de 2025;13:1661937. doi:10.3389/fpubh.2025.1661937
62. Orellano P, Kasdagli MI, Pérez Velasco R, Samoli E. Long-Term Exposure to Particulate Matter and Mortality: An Update of the WHO Global Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Public Health*. 27 de septiembre de 2024;69:1607683. doi:10.3389/ijph.2024.1607683
63. Borro M, Di Girolamo P, Gentile G, De Luca O, Preissner R, Marcolongo A, et al. Evidence-Based Considerations Exploring Relations between SARS-CoV-2 Pandemic and Air Pollution: Involvement of PM2.5-Mediated Up-Regulation of the Viral Receptor ACE-2. *Int J Environ Res Public Health*. 2 de agosto de 2020;17(15):5573. doi:10.3390/ijerph17155573
64. Zhu J, Zhou Y, Lin Q, Wu K, Ma Y, Liu C, et al. Causal relationship between particulate matter and COVID-19 risk: A mendelian randomization study. *Heliyon*. marzo de 2024;10(5):e27083. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e27083
65. Hyman S, Zhang J, Andersen ZJ, Cruickshank S, Møller P, Daras K, et al. Long-term exposure to air pollution and COVID-19 severity: A cohort study in Greater Manchester, United Kingdom. *Environ Pollut*. junio de 2023;327:121594. doi:10.1016/j.envpol.2023.121594
66. Liang D, Shi L, Zhao J, Liu P, Sarnat JA, Gao S, et al. Urban Air Pollution May Enhance COVID-19 Case-Fatality and Mortality Rates in the United States. *The Innovation*. noviembre de 2020;1(3):100047. doi:10.1016/j.xinn.2020.100047
67. Sheppard N, Carroll M, Gao C, Lane T. Particulate matter air pollution and COVID-19 infection, severity, and mortality: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ*. julio de 2023;880:163272. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163272
68. Presidencia del Consejo de Ministros. Decreto Supremo N.º 074-2001-PCM, aprueban el Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire [Internet]. 2001. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/4703292-074-2001-pcm>
69. Congreso de la República. Ley N.º 28611 [Internet]. 2017. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/congreso-de-la-republica/normas-legales/3569-28611>

70. Presidencia de la República. Decreto Legislativo N.º 1013, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente y Sernanp. [Internet]. [citado 21 de mayo de 2026]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/normas-legales/4544726-1013>
71. Ordoñez-Aquino C, Gonzales GF. Calidad del aire en Perú no se ajusta a los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). *Rev Médica Hered.* 2023;34(4):236–8.
72. Ministerio de Salud. Nota de Prensa: Episodios de infecciones respiratorias agudas disminuyen en 5 % en comparación con el 2024 [Internet]. 2025. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/1247724-episodios-de-infecciones-respiratorias-agudas-disminuyen-en-5-en-comparacion-con-el-2024>
73. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Estadísticas Ambientales: Enero 2025 [Internet]. 2025. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/6410483-estadisticas-ambientales-enero-2025>
74. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Nota de Prensa: OEFA registró 248 alertas ambientales a través de las estaciones de monitoreo automáticas en lo que va del año [Internet]. 2025. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/oefa/noticias/1137675-oefa-registro-248-alertas-ambientales-a-traves-de-las-estaciones-de-monitoreo-automaticas-en-lo-que-va-del-ano>
75. Federal Register [Internet]. 2024. Reconsideration of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. Disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2024/03/06/2024-02637/reconsideration-of-the-national-ambient-air-quality-standards-for-particulate-matter>
76. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. OJ L [Internet]. 21 de mayo de 2008. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>
77. Quispe JP, Diaz DZ, Alvarez-Tolentino D, Cruz AHDL, Payano IU, Caysahuana AC, et al. Temporal Trend of PM_{2.5} and the Associated Risk to Human Health in the Lima Metropolitan Area. *Int J Sustain Dev Plan* [Internet]. 2024 [citado 22 de mayo de 2026];19(12). Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=17437601&AN=182055846&h=5oIaIuiDQhiFOOdX4O3r4VdPTT9WIe4N8u2bnZghQMh%2BoR51R4FmWacma0ZGUyF3qzEfp%2Fe4HxSuAJpN%2F1VA%3D%3D&crl=c>
78. Montaña F. Ojo Público [Internet]. 2023 [citado 22 de mayo de 2026]. Contaminación en el aire de ciudades peruanas supera los límites de la OMS.

Disponible en: <https://ojo-publico.com/derechos-humanos/salud/contaminacion-el-aire-ciudades-peruanas-supera-limites-la-oms>

79. Source International. Estado de calidad de agua en el territorio minero de Cerro de Pasco, Perú [Internet]. London; 2023. Disponible en: https://assets-global.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/662627c55a8f93ae562c5462_Informe%20CDP%20estudio%202023_Publicado%202024.pdf
80. Morales EGR, Escudero AMM, Escudero CSM. La contaminación del aire por el material particulado y su relación con las enfermedades de tipo respiratorio en la población de Cerro de Pasco (2010 y 2016). *Ind Data*. 2019;22(1):173–9.
81. Tirado B, Vladimir D. Influencia de la contaminación del aire en las enfermedades asmática bronquial en niños del distrito de Chiclayo en los años 2013–2015 [Internet]. [citado 22 de mayo de 2026]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUDL_8a720931c1a10cea70cbbb468206146
82. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Perú: Proyecciones de Población, Según Departamento, Provincia y Distrito, 2018-2020 [Internet]. Lima, Perú; 2020. (Boletín Especial N° 26). Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1715/libro.pdf
83. Romero Y, Diaz C, Meldrum I, Velasquez RA, 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* [Internet]. 2020 [citado 22 de mayo de 2026];6(6). Disponible en: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(20\)30873-2](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(20)30873-2)
84. Sánchez-Ccoyllo OR, Arrate-Morán J, Ordoñez-Aquino CG, Marín-Huachaca NS, Reátegui-Romero W. Describing aerosol and assessing health effects in Lima, Peru. [Internet]. 2021. Disponible en: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20220485777>
85. Fano-Sizgorich D, Vásquez-Velásquez C, Ordoñez-Aquino C, Sánchez-Ccoyllo O, Tapia V, Gonzales GF. Iron trace elements concentration in PM10 and Alzheimer’s disease in Lima, Peru: Ecological study. *Biomedicines*. 2024;12(9):2043.
86. 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*. 2019;11(6):641.
87. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Boletín de Vigilancia de la Calidad del Aire en el Área Metropolitana de Lima y Callao – Diciembre 2024. [Internet]. Lima, Perú: SENAMHI; 2024. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201SENA-141.pdf>

88. Muñoz Vilela AJ, Campos Diaz AH. Impacto de las emisiones de PM_{2,5} y PM₁₀ en los cambios de sus niveles de concentración en el Área Metropolitana de Lima: un estudio de caso [Internet]. [Lima, Perú]: Universidad Peruana Unión; 2024 [citado 22 de mayo de 2026]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UEPU_5d10f26254c34cf47e2a2fac2bcfd023
89. IQAir. 2024 World Air Quality Report [Internet]. Steinach, Switzerland; 2025. Disponible en: <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report>
90. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Nota de Prensa: Lima Metropolitana alcanza niveles insalubres de calidad del aire [Internet]. 2025. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/noticias/1177344-lima-metropolitana-alcanza-niveles-insalubres-de-calidad-del-aire>
91. Cueva Alvarez JN. Evaluación de la calidad del aire por emisiones del material particulado y su relación con las enfermedades respiratorias agudas en el distrito de Puente Piedra, Lima Perú, 2014-2017 [Internet]. [Lima, Perú]: Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2023 [citado 22 de mayo de 2026]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNMS_afb39c3cffdf4cf3661719e38b0c8ca9
92. Rojas JP, Urdanivia FR, Garay RA, García AJ, Enciso C, Medina EA, et al. Effects of COVID-19 pandemic control measures on air pollution in Lima metropolitan area, Peru in South America. *Air Qual Atmosphere Health*. junio de 2021;14(6):925–33. doi:10.1007/s11869-021-00990-3
93. Velayarce D, Bustos Q, García MP, Timaná C, Carbajal R, Salvatierra N, et al. Air quality analysis in lima, peru using the NO₂ levels during the COVID-19 pandemic lockdown. *Atmosphere*. 2022;13(3):373.
94. Kephart JL, Avila-Palencia I, Bilal U, Gouveia N, Caiaffa WT, Diez Roux AV. COVID-19, Ambient Air Pollution, and Environmental Health Inequities in Latin American Cities. *J Urban Health*. junio de 2021;98(3):428–32. doi:10.1007/s11524-020-00509-8
95. Vasquez-Apestegui BV, Parras-Garrido E, Tapia V, Paz-Aparicio VM, Rojas JP, Sanchez-Ccoyllo OR, et al. Association between air pollution in Lima and the high incidence of COVID-19: findings from a post hoc analysis. *BMC Public Health*. diciembre de 2021;21(1):1161. doi:10.1186/s12889-021-11232-7
96. Gouveia N, Rodriguez-Hernandez JL, Kephart JL, Ortigoza A, Betancourt RM, Sangrador JLT, et al. Short-term associations between fine particulate air pollution and cardiovascular and respiratory mortality in 337 cities in Latin America. *Sci Total Environ*. 10 de abril de 2024;920:171073. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.171073 PubMed PMID: 38382618; PubMed Central PMCID: PMC10918459.

97. Kephart JL, Fandiño-Del-Rio M, Koehler K, Bernabe-Ortiz A, Miranda JJ, Gilman RH, et al. Indoor air pollution concentrations and cardiometabolic health across four diverse settings in Peru: a cross-sectional study. *Environ Health.* diciembre de 2020;19(1):59. doi:10.1186/s12940-020-00612-y
98. Tapara Aguilar E. Determinación del impacto del material particulado pm-10 en la calidad del aire en el AA. HH. Túpac Amaru – Ate – Lima. [Lima, Perú]: Universidad Alas Peruanas; 2015.
99. Grau Bravo AA. Contaminación por partículas de pm10 y su incidencia en enfermedades respiratorias en niños menores de 10 años en el distrito de Independencia-Lima Metropolitana, en el periodo 2,016 – 2,017. [Lima, Perú]: Universidad Nacional Federico Villarreal; 2018.
100. Cabrera Díaz JC. Material particulado 2.5 micrómetros (μM) y la morbilidad respiratoria en los habitantes de Santa Luzmila en el distrito de Comas. [Lima, Perú]: Universidad Nacional Federico Villarreal; 2019.
101. Chagua Namuche KD. Asociación del material particulado (PM10-PM2.5) con las enfermedades respiratorias en Jesús María. [Lima, Perú]: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión; 2022.
102. Miranda JJ. Impacto económico en la salud por contaminación del aire en Lima Metropolitana. *Investigaciones* [Internet]. 2005 [citado 23 de mayo de 2026]. Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/bbj/invcie/29.html>
103. Seguro Social de Salud. Nota de Prensa: EsSalud registra más de 966 mil casos de infecciones respiratorias agudas a nivel nacional y refuerza campañas informativas [Internet]. 2024. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/essalud/noticias/983311-essalud-registra-mas-de-966-mil-casos-de-infecciones-respiratorias-agudas-a-nivel-nacional-y-refuerza-campanas-informativas>
104. Municipalidad de Lima. Estudiar la calidad del aire en nuestra ciudad puede salvar vidas [Internet]. 2020. Disponible en: <https://smia.munlima.gob.pe/novedades/estudiar-la-calidad-del-aire-en-nuestra-ciudad-puede-salvar-vidas>
105. Mormontoy W, Gastañaga C, Gonzales GF. Blood lead levels among police officers in Lima and Callao, 2004. *Int J Hyg Environ Health.* noviembre de 2006;209(6):497–502. doi:10.1016/j.ijheh.2006.04.010
106. Tapia V, Carbajal L, Vásquez V, Espinoza R, Vásquez-Velásquez C, Steenland K, et al. Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2,5 y 10), dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú. *Rev Peru Med Exp Salud Pública.* 3 de julio de 2018;35(2):190. doi:10.17843/rpmesp.2018.352.3250

107. Alania Armas SF. Factores de riesgo en la salud del personal del área de limpieza pública de la municipalidad distrital de Carabayllo 2017 [Internet]. 2017 [citado 13 de julio de 2026]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UGV_41cba0842fb61ed9b3861910a8eea79e