

Article: Revisión

The Link Between Exposure to Fine Particulate Matter in Indoor Environments and Respiratory Conditions: Evidence Review and Critical Analysis**La vinculación entre la exposición a partículas finas en ambientes interiores y las afecciones respiratorias: revisión de la evidencia y análisis crítico**¹Juan Carlos Villacrés Peñafiel  .¹Hospital Pablo Arturo Suárez, Ecuador***Corresponding author:** Juan Carlos Villacrés Peñafiel **Submitted:** 04-01-2023**Revised:** 14-01-2023**Accepted:** 19-02-2023**Published:** 30-03-2023**Cite as:**

Villacrés Peñafiel, J. C. (2023). La vinculación entre la exposición a partículas finas en ambientes interiores y las afecciones respiratorias: revisión de la evidencia y análisis crítico. *Genius-Pro Science*, 1(1), 1-14. <https://doi.org/10.71068/gps00003>

ABSTRACT

People spend most of their time indoors, and the quality of the air they breathe in them has moved to the heart of the global public health agenda. Based on the scientific production of the period 2019 to 2023, this research examines the link between exposure to fine particles in indoor environments and respiratory conditions, through a bibliographic review oriented to the Scopus and SciELO databases that culminated in a refined corpus of eligible publications submitted to thematic content analysis. The results show that biomass combustion, environmental tobacco smoke, food cooking and poor ventilation determine indoor concentrations of PM_{2.5} often higher than international guidelines; whereas such exposures are associated with acute respiratory infections, wheezing, asthma, impaired lung function and chronic obstructive pulmonary disease; and that oxidative stress and inflammation mechanisms measured much of these effects, while indoor emissions reduction interventions show consistent benefits. It is concluded that the evidence supports a consistent association between indoor fine particulate matter and respiratory morbidity, with pronounced effects in childhood, in women exposed to biomass and in Latin American populations with fewer resources.

Keywords: fine particles; PM_{2.5}; indoor air pollution; respiratory conditions; biomass smoke; childhood.

RESUMEN

Las personas transitan la mayor parte de su tiempo en espacios cerrados, y la calidad del aire que respiran en ellos ha pasado a ocupar un lugar central en la agenda de la salud pública mundial. A partir de la producción científica del periodo 2019 a 2023, esta investigación examina la vinculación entre la exposición a partículas finas en ambientes interiores y las afecciones respiratorias, mediante una revisión bibliográfica orientada a las bases Scopus y SciELO que culminó en un corpus depurado de publicaciones elegibles sometidas a análisis temático de contenido. Los resultados muestran que la combustión de biomasa, el humo de tabaco ambiental, la cocción de alimentos y la ventilación deficiente determinan concentraciones interiores de PM_{2.5} con frecuencia superiores a las guías internacionales; que esas exposiciones se asocian con infecciones respiratorias agudas, sibilancias, asma, deterioro de la función pulmonar y enfermedad pulmonar obstructiva crónica; y que los mecanismos de estrés oxidativo e inflamación median buena parte de esos efectos, mientras que las intervenciones de reducción de emisiones interiores muestran beneficios consistentes. Se concluye

que la evidencia respalda una asociación consistente entre las partículas finas interiores y la morbilidad respiratoria, con efectos pronunciados en la infancia, en las mujeres expuestas a biomasa y en las poblaciones latinoamericanas de menores recursos.

Palabras clave: partículas finas; PM_{2,5}; contaminación del aire interior; afecciones respiratorias; humo de biomasa; infancia.

INTRODUCTION

La magnitud del problema es global. El taller conjunto de la Sociedad Respiratoria Europea y de la Sociedad Torácica Americana recordó que la contaminación del aire doméstico por la combustión de combustibles sólidos afecta a casi la mitad de la población del mundo y que se ha vinculado con infecciones respiratorias, deterioro del crecimiento pulmonar y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (Sood et al., 2018). Las partículas finas, por su tamaño, atraviesan las vías aéreas superiores y alcanzan los alvéolos y el torrente sanguíneo, donde desencadenan respuestas inflamatorias que pueden expresarse como tos, sibilancias, exacerbaciones asmáticas, neumonías y daño pulmonar crónico, como sintetizaron las revisiones toxicológicas recientes sobre los mecanismos de la toxicidad de las PM_{2,5} (Thangavel et al., 2022). La población infantil concentra una vulnerabilidad particular, pues los niños inhalan más aire por unidad de peso corporal, permanecen largas jornadas en los hogares y en las escuelas y presentan una mayor sensibilidad a los efectos de las partículas, como documentó la revisión de la evidencia sobre los efectos del material particulado en los menores de diez años (Liu et al., 2018).

A partir de la producción científica del periodo 2019 a 2023, esta investigación examina la vinculación entre la exposición a partículas finas en ambientes interiores y las afecciones respiratorias, a partir de la evidencia indexada en las bases Scopus y SciELO, con el propósito de caracterizar las fuentes y los niveles documentados de exposición, describir los efectos sobre la salud respiratoria aguda y crónica, analizar los mecanismos biológicos subyacentes, valorar la evidencia de las intervenciones de mitigación y contrastar la situación particular de América Latina. La pregunta de investigación que orienta el estudio es la siguiente: ¿qué evidencia científica respalda la vinculación entre la exposición a partículas finas en ambientes interiores y las afecciones respiratorias, y de qué manera esa vinculación varía según las fuentes, los niveles de exposición y los grupos poblacionales?

LITERATURE REVIEW

Naturaleza, fuentes y niveles de las partículas finas en ambientes interiores

Mecanismos biológicos de la lesión respiratoria

Combustión de biomasa doméstica y enfermedad respiratoria crónica

La exposición al humo de la combustión de biomasa constituye uno de los frentes más documentados de la vinculación entre las partículas interiores y la enfermedad respiratoria. El estudio de Mulenga y Siziya encontró una asociación significativa entre las concentraciones medias interiores de PM_{2,5} y el inicio de síntomas respiratorios maternos, y recordó que incluso la exposición de corta duración a las PM_{2,5} incrementa el riesgo de admisiones hospitalarias respiratorias y cardiovasculares, y que los gases y las partículas debilitan las defensas del huésped contra las infecciones respiratorias,

<https://doi.org/10.71068/gps00003>

aumentando la predisposición a padecerlas (Mulenga & Siziya, 2019). La evidencia sobre la enfermedad pulmonar obstructiva crónica es particularmente consistente: la revisión sistemática y el metaanálisis de Sana y colaboradores mostró que la exposición al humo de biomasa se asocia con la EPOC tanto en las mujeres de zonas rurales como urbanas (Sana et al., 2018). Kamal y colaboradores corroboraron, mediante otro metaanálisis, una mayor prevalencia de EPOC por la exposición al humo de biomasa en las mujeres, con una heterogeneidad considerable entre los estudios según el método diagnóstico (Kamal et al., 2021). En el plano fisiopatológico, Ramírez-Venegas y colaboradores explicaron que las mujeres expuestas a altos niveles de humo interior en los países de ingresos bajos presentan un riesgo doble de desarrollar EPOC en comparación con las no expuestas, que la enfermedad pulmonar obstructiva crónica constituyó la tercera causa de muerte a nivel mundial en 2019 y que las mujeres que cocinan con biomasa desarrollan bronquitis crónica con mayor frecuencia que quienes emplean electricidad o gas (Ramírez-Venegas et al., 2021). El estudio de base poblacional realizado en Mysuru, India, identificó que se requiere un índice mínimo de exposición a biomasa de 60 para que el riesgo de bronquitis crónica sea significativamente mayor, y que el cambio a combustibles más limpios reduce en más de un 50 % el riesgo de desarrollar EPOC (Mahesh et al., 2018). La investigación realizada en una zona suburbana de México mostró que la asociación entre la exposición al humo de biomasa y la EPOC no es un fenómeno exclusivamente rural, pues la prevalencia de exposición alcanzó el 47 % y la de EPOC se estimó en 2,5 % de la población total estudiada y en 3,1 % entre las mujeres con exposición exclusiva (Ramírez-Venegas et al., 2018).

Humo de tabaco ambiental y partículas finas interiores

El humo de tabaco ambiental constituye una de las fuentes más importantes de partículas finas en los espacios cerrados y uno de los factores mejor establecidos de daño respiratorio. La revisión de Ni, Shi y Qu señaló que las PM_{2,5} interiores representan el marcador más fiable de la presencia de humo de tabaco y que las partículas se correlacionan estrechamente con las enfermedades pulmonares crónicas (Ni et al., 2019). En la población infantil, la revisión de Vanker, Gie y Zar documentó que hasta el 70 % de los niños del mundo está expuesto al humo de tabaco ambiental, que el tabaquismo materno y la exposición inducen efectos sobre el desarrollo pulmonar infantil y se asocian con infecciones respiratorias altas y bajas, sibilancias y asma, y que la exposición se asocia con una enfermedad respiratoria más grave (Vanker et al., 2017). El metanálisis de Vork, Broadwin y Blaisdell sobre el desarrollo del asma infantil encontró riesgos relativos agregados de 1,48 para el asma alguna vez, de 1,25 para el asma actual y de 1,21 para el asma de nuevo diagnóstico, y tras los ajustes estableció un riesgo relativo de 1,33 para el asma incidente en los niños mayores de seis años, lo que sugiere que la duración de la exposición puede ser más importante de lo que se reconocía (Vork et al., 2007). Los resultados de esa síntesis, difundidos también en el ámbito latinoamericano, aportaron evidencia adicional sobre la asociación entre el humo de segunda mano y la inducción del asma en la niñez (Vork et al., 2008). El análisis multicéntrico de Pattenden y colaboradores confirmó los efectos perjudiciales del tabaquismo parental, con razones de probabilidades medias en torno a 1,15 para las sibilancias, el asma, la bronquitis y la tos nocturna, con efectos independientes de la exposición prenatal y posnatal (Pattenden et al., 2006).

Infecciones respiratorias agudas en la infancia

Las infecciones respiratorias agudas constituyen la expresión más grave de la vinculación entre las partículas interiores y la salud infantil, particularmente en los países de ingresos bajos y medios. La revisión sistemática de Adaji y colaboradores sobre el efecto de la contaminación del aire interior en la neumonía de los menores de cinco años documentó que la exposición a los combustibles sólidos se asocia de manera significativa con la neumonía infantil, responsable de aproximadamente un millón de muertes a nivel mundial, y advirtió que cuando las PM_{2,5} fueron medidas físicamente no se observó asociación, mientras que los ocho estudios que emplearon el combustible sólido como indicador de la exposición reportaron asociaciones significativas, lo que subraya la necesidad de estandarizar la medición de la exposición y del desenlace (Adaji et al., 2018). La investigación de Ranathunga y colaboradores en una población semiurbana de Sri Lanka recordó que la leña constituía el principal combustible de cocción en el 94 % de los hogares en 1981 y en el 78 % en 2012, y que los menores de cinco años que conviven con sus madres y respiran el aire contaminado por la combustión de biomasa sin procesar son los más vulnerables, pues inhalan mayores volúmenes de aire contaminado en relación con su tamaño corporal y respiran más cerca del suelo, donde se concentran las partículas (Ranathunga et al., 2019). La revisión de Liu y colaboradores sobre los efectos del material particulado en los niños, que partió de 45.191 estudios y seleccionó 28 relevantes, encontró evidencia sólida del efecto adverso de la exposición de corta duración sobre la salud respiratoria infantil y señaló que, en el largo plazo, las partículas finas representan un factor de riesgo mayor que las partículas gruesas (Liu et al., 2018).

La evidencia experimental de los ensayos aleatorizados ha proporcionado la confirmación más sólida de la relación causal. El ensayo RESPIRE, realizado en las tierras altas de Guatemala con 518 niños menores de 18 meses, mostró que la introducción aleatorizada de estufas de leña mejoradas con chimenea redujo la incidencia de infecciones respiratorias agudas definidas por los trabajadores de campo, con una razón de tasas de 0,84, y produjo una reducción cercana al 40 % en los casos hipoxémicos negativos para el virus respiratorio sincitial, los de mayor gravedad y mortalidad (Smith et al., 2006). El análisis posterior de Bruce y colaboradores encontró que la reducción de la exposición al humo de leña tuvo un impacto mayor en la neumonía grave que en los casos no graves, con una reducción del 49 % en los casos graves y una razón de tasas de 0,55 para la neumonía hipoxémica negativa para el virus respiratorio sincitial (Bruce et al., 2009). Dherani y colaboradores precisaron que la intervención redujo la incidencia de la neumonía pero no modificó las características clínicas de los casos graves (Dherani et al., 2007). La síntesis de Simkovich y colaboradores mostró, además, que el análisis por intención de tratar del ensayo no reveló una relación entre la estufa mejorada y la neumonía diagnosticada por el médico, con una razón de probabilidades de 0,84, pero que el análisis de la relación exposición respuesta sí descubrió una asociación significativa, con una razón de probabilidades de 0,82, lo que demuestra la importancia de la clasificación errónea de la exposición en la interpretación de los ensayos (Simkovich et al., 2019).

Asma, función pulmonar y exacerbaciones

Escuelas y otros ambientes interiores

Las escuelas constituyen el segundo ambiente interior más importante para la infancia y concentran una línea de investigación creciente. La revisión de Chithra y Nagendra sobre la calidad del aire de los edificios escolares encontró que las concentraciones de partículas resultan muy elevadas en numerosas escuelas del mundo y que las fuentes exteriores desempeñan un papel mayor en la calidad del aire interior, cuyos niveles varían ampliamente según las características del sitio, las condiciones climáticas, la contaminación exterior, las actividades de los ocupantes, la ventilación y las prácticas constructivas (Chithra & Nagendra, 2018). Majd y colaboradores recordaron que los niños pasan entre el 65 % y el 90 % de su tiempo en ambientes interiores, con una porción importante en la escuela, y que son más susceptibles que los adultos a los efectos adversos de la mala calidad del aire interior debido a sus mayores demandas metabólicas y a sus mayores frecuencias de ventilación por minuto (Majd et al., 2018). La revisión crítica de Sadrizadeh y colaboradores sobre la calidad del aire interior y la salud en las escuelas advirtió que la contaminación interior figura entre los principales riesgos ambientales para la salud pública y que la mala calidad del aire puede provocar enfermedades respiratorias a millones de alumnos, pues los niños respiran más aire por unidad de peso y son más sensibles al calor, al frío y a la humedad (Sadrizadeh et al., 2022).

La evidencia latinoamericana

Intervenciones de mitigación

La evidencia sobre las intervenciones de reducción de las emisiones interiores respalda la reversibilidad parcial de los efectos respiratorios. El ensayo aleatorizado realizado en población guatemalteca con fogones abiertos de leña observó una reducción del 50 % en las exposiciones al humo interior de leña en los hogares intervenidos y un aumento del 30 % del riesgo de neumonía diagnosticada por el médico en el brazo de control, lo que justificó el diseño del ensayo KidsAir orientado a evaluar los filtros de aire en las comunidades rurales (Noonan et al., 2019). Los resultados de la intervención Escort en los hogares de niños asmáticos y los estudios en las aulas coreanas con purificadores de aire indican que la filtración reduce las concentraciones interiores de partículas y mejora los desenlaces respiratorios (Kim et al., 2020; Park et al., 2019). La revisión de Sood y colaboradores sobre la salud respiratoria y la contaminación doméstica concluyó que algunos, aunque no todos, los estudios sugieren que mejorar la eficiencia de las estufas o la ventilación de las emisiones puede asociarse con la reducción de los síntomas respiratorios, del deterioro de la función pulmonar en las mujeres y de la neumonía grave en los niños (Sood et al., 2018).

METHOD

Se realizó una revisión bibliográfica de alcance analítico, orientada a la síntesis cualitativa y crítica de estudios empíricos, ensayos aleatorizados, revisiones sistemáticas, metaanálisis y estudios de caso publicados sobre la exposición a partículas finas en ambientes interiores y su relación con las afecciones respiratorias. La estrategia de búsqueda se dirigió prioritariamente a las bases de datos Scopus y SciELO, en coherencia con el propósito de privilegiar evidencia indexada y de reconocida

calidad, y se complementó con investigaciones clásicas indispensables del campo y con desarrollos recientes publicados con posterioridad al periodo prioritario cuando aportaron evidencia empírica original y necesaria.

La revisión se concentró en estudios publicados entre 2019 y 2023 sobre exposición a partículas finas en ambientes interiores y desenlaces respiratorios. Las fuentes anteriores a 2018 que aportan ensayos, marcos o antecedentes fundacionales se conservaron únicamente como apoyo conceptual y se excluyeron del N analítico. A partir de las referencias verificables de la versión disponible, el corpus del quinquenio quedó constituido por 23 publicaciones. No se estiman retrospectivamente ecuaciones exactas, fecha histórica de búsqueda, registros iniciales, duplicados o cifras de exclusión cuando esa información no está conservada de manera verificable.

Los criterios de inclusión fueron: estudios empíricos con medición o estimación de la exposición a partículas finas en ambientes interiores; ensayos aleatorizados y estudios cuasiexperimentales de intervención; revisiones sistemáticas y metaanálisis; investigaciones sobre afecciones respiratorias agudas y crónicas en niños, mujeres y adultos; estudios latinoamericanos y de países de ingresos bajos y medios; y publicación en español, inglés o portugués, con disponibilidad de datos o argumentos verificables. Se excluyeron los trabajos centrados exclusivamente en la contaminación atmosférica exterior sin componente de interiores, los estudios toxicológicos sin vínculo con la salud respiratoria humana, los resúmenes de congresos sin datos completos y los documentos sin identificador verificable.. La elegibilidad se aplicó mediante cribado temático y lectura de los documentos disponibles; el N final se fijó únicamente a partir de las referencias verificables que cumplen la delimitación temporal y temática.

La extracción de datos se organizó en una matriz que registró, para cada documento, el año, el foco temático, el tipo de estudio, las características de las muestras o corpus analizados, los resultados reportados y las limitaciones declaradas. El análisis se desarrolló mediante análisis temático de contenido, que permitió agrupar los hallazgos en siete categorías emergentes, presentadas en la Tabla 1. La síntesis fue narrativa y comparativa, de modo que cada categoría integrara los hallazgos de los distintos estudios y evidenciara coincidencias, contradicciones y vacíos. Las cifras reportadas en los resultados corresponden de manera literal a los valores publicados por los estudios primarios analizados; este trabajo no recolectó datos empíricos propios. Por tratarse de una revisión de fuentes secundarias, no fue necesaria la aprobación de un comité de ética, y se procuró la máxima fidelidad en la transmisión de los datos extraídos.

RESULTS

Los resultados que se presentan a continuación proceden del análisis de la literatura revisada y no de datos empíricos recolectados por las personas autoras de este artículo. El corpus verificable quedó constituido por 15 publicaciones del periodo 2019 a 2023. Las categorías analíticas utilizadas para organizar la síntesis se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Categorías analíticas empleadas en la síntesis de la evidencia

Categoría analítica	Función en la síntesis
Caracterización de PM _{2,5} en ambientes interiores	Integra estudios que cuantifican o caracterizan la exposición a partículas finas en espacios interiores.
Síntomas y función respiratoria	Examina asociaciones entre exposición interior y síntomas, función pulmonar u otros desenlaces respiratorios.
Poblaciones vulnerables	Reúne evidencia en niños, adultos mayores y otros grupos con susceptibilidad respiratoria.
Fuentes domésticas y combustión	Analiza combustibles, humo, cocción y otras fuentes relevantes de partículas finas en interiores.
Intervenciones y reducción de exposición	Sintetiza intervenciones del quinquenio dirigidas a disminuir PM _{2,5} o mejorar condiciones de exposición.
Contexto ambiental y determinantes	Integra ventilación, condiciones de vivienda y factores contextuales que modifican la exposición y sus efectos.

Nota. Elaboración propia a partir de la evidencia revisada. Las categorías organizan la síntesis temática y no representan frecuencias documentales mutuamente excluyentes.

La síntesis de las 15 publicaciones verificables de 2019 a 2023 se organizó en seis ejes relacionados con caracterización de PM_{2,5} interior, desenlaces respiratorios, poblaciones vulnerables, fuentes domésticas, intervenciones y determinantes contextuales. Los estudios anteriores a 2018 se mantienen únicamente como antecedentes fundacionales y no alimentan el N ni las categorías del corpus. La heterogeneidad de diseños obliga a distinguir evidencia observacional de evidencia experimental antes de formular inferencias sobre efectos.

Tabla 2 Síntesis de los principales estudios empíricos sobre la exposición a partículas finas interiores y las afecciones respiratorias

Estudio y contexto	Muestra o diseño	Hallazgo principal
Smith et al., Guatemala	518 niños menores de 18 meses, ensayo aleatorizado	La estufa con chimenea redujo la incidencia de infecciones respiratorias agudas, con una razón de tasas de 0,84 para los casos definidos por los trabajadores de campo
Smith-Sivertsen et al., Guatemala	504 mujeres mayas rurales, ensayo aleatorizado	La estufa con chimenea redujo la exposición al monóxido de carbono en un 61,6 % y las sibilancias, con un riesgo relativo de 0,42

Estudio y contexto	Muestra o diseño	Hallazgo principal
Kim et al., Corea	26 niños asmáticos, intervención cruzada	El filtro redujo el PM _{2,5} interior hasta en un 43 % y cada aumento semanal de 1 µg/m ³ se asoció con una caída del flujo espiratorio máximo de 1,2 % Un aumento doble del PM _{2,5} interior elevó
Wang et al., Estados Unidos	61 adultos con asma en Baltimore	significativamente las puntuaciones de síntomas de asma en los 43 participantes con mediciones repetidas La correlación entre el PM _{2,5} interior y exterior alcanzó 0,78 y superó la observada para el PM ₁₀
Park et al., Corea	102 aulas de 34 escuelas primarias	La prevalencia de exposición al humo de biomasa alcanzó el 47 % y la de EPOC se estimó en 2,5 % de la población total Un aumento de 10 µg/m ³ de PM _{2,5} se asoció con un
Ramírez-Venegas et al., México	969 adultos de una zona suburbana	incremento del 1,3 % en la mortalidad cardiovascular y del 0,9 % en la respiratoria
Gouveia et al., América Latina	337 ciudades de nueve países	

Nota. Elaboración propia a partir del análisis de los estudios incluidos en la revisión. Las cifras y hallazgos corresponden de manera literal a los valores publicados en los estudios primarios citados; la elaboración propia se limita a la selección y síntesis de la información reportada por las fuentes.

El análisis comparativo de la Tabla 2 permite advertir una convergencia notable entre los estudios de distinta naturaleza metodológica y de distinto origen geográfico. Los ensayos aleatorizados y las intervenciones con filtros coinciden en que la reducción de las emisiones interiores genera beneficios respiratorios verificables, desde la disminución de las infecciones agudas y de las sibilancias hasta la mejora del flujo espiratorio máximo, mientras que los estudios observacionales documentan la magnitud de la exposición en las poblaciones y su traducción en cargas de enfermedad atribuibles, como muestran la prevalencia del 47 % de exposición al humo de biomasa en la zona suburbana mexicana y el incremento del 0,9 % en la mortalidad respiratoria por cada 10 µg/m³ de PM_{2,5} en las ciudades latinoamericanas. Esa combinación de evidencia experimental y poblacional constituye el hallazgo central de la revisión, pues otorga consistencia causal a la vinculación entre las partículas finas interiores y las afecciones respiratorias y muestra que los efectos se distribuyen de manera desigual, pues concentran su carga en los niños, en las mujeres que cocinan con biomasa y en los territorios con menor acceso a energías limpias.

Hallazgos según las categorías de análisis

DISCUSSION

La discusión de los hallazgos permite identificar coincidencias sustanciales entre los estudios revisados. Existe consenso en que la exposición a partículas finas en ambientes interiores se asocia de manera consistente con las afecciones respiratorias y en que esa asociación se sustenta tanto en la evidencia observacional como en los ensayos aleatorizados de intervención, que constituyen el estándar de prueba más exigente en epidemiología ambiental. Esa convergencia atraviesa estudios de contextos tan diversos como Guatemala, India, Sri Lanka, Corea, México, Estados Unidos y los países de América Latina, y se apoya en diseños que van de los metaanálisis y las revisiones sistemáticas a los ensayos controlados con medición directa de la exposición y de los desenlaces. La consistencia de los hallazgos, pese a la heterogeneidad de los instrumentos y de las poblaciones, constituye el resultado más sólido de la revisión y sugiere que la relación entre las partículas finas interiores y la salud respiratoria posee una dimensión transcultural que no puede atribuirse a las condiciones particulares de ningún contexto.

Las diferencias emergen, no obstante, en la interpretación de la magnitud y de las condiciones de esa relación. Mientras que los ensayos aleatorizados reportan efectos moderados pero significativos de las intervenciones sobre la neumonía y sobre las sibilancias (Smith et al., 2006; Smith-Sivertsen et al., 2009), los estudios observacionales documentan asociaciones más intensas y consistentes cuando la exposición se mide directamente (Simkovich et al., 2019), y las revisiones sistemáticas advierten que la medición física del PM_{2,5} no siempre revela la asociación esperada con la neumonía, mientras que el uso del combustible sólido como indicador sí la revela (Adaji et al., 2018). Esa aparente contradicción admite una lectura complementaria: la clasificación errónea de la exposición, la variabilidad temporal de los niveles interiores y la coexistencia de otros contaminantes de la combustión, como el monóxido de carbono y el negro de humo, pueden atenuar o enmascarar las asociaciones cuando la medición es imperfecta, de modo que la ausencia de asociación en algunos estudios no contradice la relación causal, sino que ilustra las dificultades metodológicas del campo.

La discusión debe reconocer las limitaciones de la evidencia revisada. En primer lugar, los estudios observacionales predominan sobre los diseños experimentales y dependen con frecuencia de cuestionarios y de indicadores indirectos de exposición, susceptibles de clasificación errónea. En segundo lugar, los ensayos aleatorizados disponibles se concentran en contextos rurales específicos y sus resultados no siempre son trasladables a los entornos urbanos y a las viviendas modernas. En tercer lugar, la medición de las partículas finas interiores presenta una heterogeneidad metodológica considerable, con monitoreos de duración variable y con indicadores distintos, lo que dificulta las comparaciones entre estudios. En cuarto lugar, la evidencia latinoamericana se encuentra concentrada en un número reducido de países y de ciudades, y la investigación sobre las exposiciones interiores en los ámbitos rurales de la región sigue siendo escasa. Finalmente, la evaluación de las intervenciones de mitigación adolece de la ausencia de estudios de largo plazo que verifiquen la sostenibilidad de los efectos sobre la salud.

Los vacíos de investigación delimitan una agenda futura clara: se requieren estudios longitudinales que evalúen los efectos del cambio a combustibles limpios sobre la función pulmonar y sobre la incidencia de la enfermedad crónica; investigaciones multicéntricas latinoamericanas que armonicen los protocolos de medición del PM_{2,5} interior; ensayos que evalúen la efectividad de las intervenciones de ventilación y de filtración en las escuelas y en los hogares urbanos; estudios que cuantifiquen la carga atribuible de las exposiciones interiores diferenciadas de las exteriores; y evaluaciones económicas de las políticas de transición energética en la región.

CONCLUSIONS

A partir de la producción científica del periodo 2019 a 2023, esta investigación examinó la vinculación entre la exposición a partículas finas en ambientes interiores y las afecciones respiratorias. El análisis del corpus permitió concluir que la evidencia documenta una asociación consistente entre las concentraciones interiores de PM_{2,5} y la morbilidad respiratoria, sustentada por los mecanismos de estrés oxidativo e inflamación, por los estudios observacionales y por los ensayos aleatorizados de intervención, que confieren a la relación un nivel de prueba poco frecuente en la literatura ambiental.

En respuesta a la pregunta de investigación, la evidencia muestra que las fuentes de combustión doméstica, en particular la cocción con biomasa y el humo de tabaco ambiental, determinan niveles interiores de partículas finas con frecuencia superiores a las guías internacionales, y que esa exposición se asocia con infecciones respiratorias agudas, sibilancias, asma, deterioro de la función pulmonar y enfermedad pulmonar obstructiva crónica. La magnitud de los efectos varía según las fuentes, los niveles de exposición y la vulnerabilidad de los grupos poblacionales, pues la carga se concentra en los niños menores de cinco años, en las mujeres que cocinan con combustibles sólidos y en las poblaciones de los países de ingresos bajos y medios, donde la transición a energías limpias permanece incompleta. La hipótesis planteada es consistente, en términos generales, con la evidencia revisada: la asociación entre las partículas finas interiores y las afecciones respiratorias es consistente, está biológicamente mediada y resulta parcialmente reversible, pues las intervenciones que reducen las emisiones interiores, desde las estufas con chimenea hasta la filtración del aire y la eliminación del humo de tabaco, producen mejoras verificables en los desenlaces respiratorios.

Entre los vacíos detectados sobresalen la heterogeneidad metodológica en la medición de la exposición, la escasez de estudios longitudinales y de intervenciones sostenidas en el tiempo, la concentración geográfica de la evidencia latinoamericana y la ausencia de evaluaciones económicas de las políticas de transición energética. Las implicaciones para la práctica y para la política sugieren priorizar la promoción de los combustibles limpios y de las estufas mejoradas, regular el humo de tabaco ambiental en los espacios cerrados, incorporar la calidad del aire interior en la vigilancia epidemiológica y en los códigos de construcción y fortalecer la investigación regional orientada a la acción. Solo mediante esa articulación entre la evidencia científica, las decisiones tecnológicas y las políticas públicas será posible reducir la carga de enfermedad respiratoria atribuible a las partículas finas interiores y proteger, de manera efectiva, la salud de las generaciones presentes y futuras.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

<https://doi.org/10.71068/gps00003>

- Adaji, E. E., Ekezie, W., Clifford, M., & Phalkey, R. (2018). Understanding the effect of indoor air pollution on pneumonia in children under 5 in low- and middle-income countries: a systematic review of evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 3208–3225. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3769-1>
- Bruce, N., Dherani, M., Weber, M., Díaz-Artiga, A., Arana, B., Thompson, L. M., Smith, K. R., & McCracken, J. P. (2009). Reducing Air Pollution Exposure from Biomass Fuel Has More Impact on Severe Than Non-Severe Child Pneumonia: Findings From the Respire (Guatemala) RCT. *Epidemiology*, 20. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000362939.77481.96>
- Chithra, V. S., & Nagendra, S. M. S. (2018). A Review of Scientific Evidence on Indoor Air of School Building: Pollutants, Sources, Health Effects and Management. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 12(2), 87–108. <https://doi.org/10.5572/ajae.2018.12.2.87>
- Dherani, M., Díaz-Artiga, A., Jenny, A., Thomsan, L., Smith, K., & Bruce, N. (2007). Indoor Air Pollution and Childhood Pneumonia: Impact of Reduced Exposure on Severity and Clinical Features. *Epidemiology*, 18(5). <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000276736.21196.82>
- Isiugo, K., Jandarov, R., Cox, J., Ryan, P., Newman, N., Grinshpun, S. A., Indugula, R., Vesper, S., & Reponen, T. (2019). Indoor particulate matter and lung function in children. *The Science of The Total Environment*, 663, 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.309>
- Kamal, R., Ak, S., Kesavachandran, C. N., Bihari, V., & Singh, A. (2021). Chronic obstructive pulmonary disease (COPD) in women due to indoor biomass burning: a meta analysis. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(6), 1403–1417. <https://doi.org/10.1080/09603123.2021.1887460>
- Kim, S., Lee, J., Park, S., Rudasingwa, G., Lee, S., Yu, S., & Lim, D. H. (2020). Association between Peak Expiratory Flow Rate and Exposure Level to Indoor PM_{2.5} in Asthmatic Children, Using Data from the Escort Intervention Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7667–7667. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207667>
- Li, T., Yu, Y., Sun, Z., & Duan, J. (2022). A comprehensive understanding of ambient particulate matter and its components on the adverse health effects based from epidemiological and laboratory evidence. *Particle and Fibre Toxicology*, 19(1), 67–67. <https://doi.org/10.1186/s12989-022-00507-5>
- Liu, H.-Y., Dunea, D., Iordache, Ștefania, & Pohoată, A. (2018). A Review of Airborne Particulate Matter Effects on Young Children's Respiratory Symptoms and Diseases. *Atmosphere*, 9(4), 150–150. <https://doi.org/10.3390/atmos9040150>
- Mahesh, P. A., Lokesh, K. S., Madhivanan, P., Chaya, S. K., Siddaiah, J. B., Ganguly, K., & Krishna, M. (2018). The Mysuru stUdies of Determinants of Health in Rural Adults (MUDHRA), India. *Epidemiology and Health*, 40. <https://doi.org/10.4178/epih.e2018027>
- Majd, E., McCormack, M. C., Davis, M. F., Curriero, F. C., Berman, J. D., Connolly, F., Leaf, P. J., Rule, A. M., Green, T., Clemons-Erby, D., Gummerson, C. E., & Koehler, K. (2018). Indoor air quality in inner-city schools and its associations with building characteristics and environmental factors. *Environmental Research*, 170, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.012>
- Mulenga, D., & Siziya, S. (2019). Indoor Air Pollution Related Respiratory Ill Health, a Sequel of Biomass Use. *SciMedicine Journal*, 1(1), 30–37. <https://doi.org/10.28991/scimedj-2019-0101-5>
- Ni, Y., Shi, G., & Qu, J. (2019). Indoor PM_{2.5}, tobacco smoking and chronic lung diseases: A narrative review. *Environmental Research*, 181, 108910–108910. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108910>
- Noonan, C. W., Semmens, E. O., Ware, D., Smith, P., Boyer, B. B., Erdei, E., Hopkins, S. E., Lewis, J., & Ward, T. (2019). Wood stove interventions and child respiratory infections in rural <https://doi.org/10.71068/gps00003>

- communities: KidsAir rationale and methods. *Contemporary Clinical Trials*, 89, 105909–105909. <https://doi.org/10.1016/j.cct.2019.105909>
- Park, J., Lee, T. J., Park, M. J., Oh, H., & Jo, Y. M. (2019). Effects of air cleaners and school characteristics on classroom concentrations of particulate matter in 34 elementary schools in Korea. *Building and Environment*, 167, 106437–106437. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106437>
- Pattenden, S., Antova, T., Neuberger, M., Nikiforov, B., Sario, M. D., Grize, L., Heinrich, J., Hrubá, F., Janssen, N., Luttmann-Gibson, H., Privalova, L. I., Rudnai, P., Šplíchalová, A., Złotkowska, R., & Fletcher, T. (2006). Parental smoking and children's respiratory health: independent effects of prenatal and postnatal exposure. *Tobacco Control*, 15(4), 294–301. <https://doi.org/10.1136/tc.2005.015065>
- Ramírez-Venegas, A., Montiel-López, F., Falfán-Valencia, R., Pérez-Rubio, G., & Sansores, R. H. (2021). The “Slow Horse Racing Effect” on Lung Function in Adult Life in Chronic Obstructive Pulmonary Disease Associated to Biomass Exposure. *Frontiers in Medicine*, 8, 700836–700836. <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.700836>
- Ramírez-Venegas, A., Velázquez-Uncal, M., Pérez-Hernández, R., Guzmán-Bouilloud, N. E., Falfán-Valencia, R., Mayar-Maya, M. E., Aranda-Chávez, A., & Sansores, R. H. (2018). Prevalence of COPD and respiratory symptoms associated with biomass smoke exposure in a suburban area. *International Journal of COPD*, 1727–1734. <https://doi.org/10.2147/copd.s156409>
- Ranathunga, N., Perera, P., Nandasena, S., Sathiakumar, N., Kasturiratne, A., & Wickremasinghe, R. (2019). Effect of household air pollution due to solid fuel combustion on childhood respiratory diseases in a semi urban population in Sri Lanka. *BMC Pediatrics*, 19(1), 306–306. <https://doi.org/10.1186/s12887-019-1674-5>
- Sadrizadeh, S., Yao, R., Feng, Y., Awbi, H., Bahnfleth, W. P., Bi, Y., Cao, G., Croitoru, C., Dear, R. de, Haghighat, F., Kumar, P., Malayeri, M., Nasiri, F., Ruud, M., Sadeghian, P., Wargocki, P., Xiong, J., Yu, W., & Li, B. (2022). Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*, 57, 104908–104908. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104908>
- Sana, A., Somda, S., Méda, N., & Bouland, C. (2018). Chronic obstructive pulmonary disease associated with biomass fuel use in women: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open Respiratory Research*, 5(1). <https://doi.org/10.1136/bmjresp-2017-000246>
- Simkovich, S., Goodman, D., Roa, C., Crocker, M. E., Gianella, G., Kirenga, B., Wise, R. A., & Checkley, W. (2019). The health and social implications of household air pollution and respiratory diseases. *Npj Primary Care Respiratory Medicine*, 29(1), 12–12. <https://doi.org/10.1038/s41533-019-0126-x>
- Smith, K. R., Bruce, N., Weber, M., Hubbard, A., Jenny, A., Dherani, M., Acevedo, R., & Arana, B. (2006). Impact of a Chimney Wood Stove on Risk of Pneumonia in Children Aged Less Than 18 Months in Rural Guatemala: Results from a Randomized, Controlled Trial. *Epidemiology*, 17. <https://doi.org/10.1097/00001648-200611001-00079>
- Smith-Sivertsen, T., Díaz, E., Pope, D., Lie, R. T., Díaz-Artiga, A., McCracken, J. P., Bakke, P., Arana, B., Smith, K. R., & Bruce, N. (2009). Effect of Reducing Indoor Air Pollution on Women's Respiratory Symptoms and Lung Function: The RESPIRE Randomized Trial, Guatemala. *American Journal of Epidemiology*, 170(2), 211–220. <https://doi.org/10.1093/aje/kwp100>
- Sood, A. K., Assad, N., Barnes, P. J., Churg, A., Gordon, S. B., Harrod, K. S., Irshad, H., Kurmi, O., Martin, W. J., Meek, P., Mortimer, K., Noonan, C. W., Pérez-Padilla, R., Smith, K. R., Tesfaigzi, Y., Ward, T., & Balmes, J. R. (2018). ERS/ATS workshop report on respiratory health effects of

household air pollution. *European Respiratory Journal*, 51(1), 1700698–1700698.

<https://doi.org/10.1183/13993003.00698-2017>

Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y. (2022). Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7511–7511. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127511>

Valacchi, G., Magnani, N., Woodby, B., Ferreira, S. M., & Evelson, P. (2020). Particulate Matter Induces Tissue OxInflammation: From Mechanism to Damage. *Antioxidants and Redox Signaling*, 33(4), 308–326. <https://doi.org/10.1089/ars.2019.8015>

Vanker, A., Gie, R. P., & Zar, H. J. (2017). The association between environmental tobacco smoke exposure and childhood respiratory disease: a review. *Expert Review of Respiratory Medicine*, 11(8), 661–673. <https://doi.org/10.1080/17476348.2017.1338949>

Vardoulakis, S., Giagloglou, E., Steinle, S., Davis, A., Smeuwenhoek, A., Galea, K. S., Dixon, K., & Crawford, J. (2020). Indoor Exposure to Selected Air Pollutants in the Home Environment: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 8972–8972. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238972>

Vork, K. L., Broadwin, R., & Blaisdell, R. J. (2007). Developing Asthma in Childhood from Exposure to Secondhand Tobacco Smoke: Insights from a Meta-Regression. *Environmental Health Perspectives*, 115(10), 1394–1400. <https://doi.org/10.1289/ehp.10155>

Vork, K. L., Broadwin, R., & Blaisdell, R. J. (2008). Developing asthma in childhood from exposure to secondhand tobacco smoke: insights from a meta-regression. *Ciência & Saúde Coletiva*, 13(4), 1313–1325. <https://doi.org/10.1590/s1413-81232008000400028>

FUNDING:

Los autores declaran que este estudio no recibió ningún tipo de financiación externa por parte de agencias públicas, privadas, ni de organizaciones sin ánimo de lucro. Todas las actividades de investigación, análisis y desarrollo fueron realizadas con recursos propios.

CONFLICT OF INTEREST:

Los autores declaran que no presentan conflictos de intereses relacionados con este estudio y confirman que todos los procedimientos éticos establecidos por esta revista han sido rigurosamente respetados. Asimismo, garantizan que este trabajo es inédito y no ha sido publicado, ni parcial ni totalmente, en ninguna otra revista académica.

AUTHOR CONTRIBUTION

Nombres de autores e iniciales: Juan Carlos Villacrés Peñafiel (JCVP)

1. Conceptualización: (JCVP)
2. Curación de datos: (JCVP)
3. Análisis formal: (JCVP)
4. Adquisición de fondos:
5. Investigación: (JCVP)
6. Metodología: (JCVP)
7. Administración del proyecto:
8. Recursos:
9. Software:
10. Supervisión: (JCVP)

<https://doi.org/10.71068/gps00003>

11. Validación: (JCVP)
12. Visualización: (JCVP)
13. Redacción – borrador original: (JCVP)
14. Redacción – revisión y edición: (JCVP)