

**Estimación de la dosis potencial de inhalación de PM_{2.5} a partir de un
sensor de bajo costo en microambientes de una vivienda en Bogotá como
fundamento de promoción de ambientes sanos**

Alvaro Alexander Moreno Toloza

Asesor

Lersen Andrés Flores Ramos

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Ambiental

2026

Resumen

Las altas concentraciones de material particulado con un diámetro de 2.5 micrómetros (PM2.5) fueron, en su momento, el principal problema medioambiental en Bogotá en ambientes intra y extramurales, especialmente por sus impactos negativos en la economía y salud de la población. No obstante, el alto costo de los equipos de medición impidió el análisis a nivel residencial. Este proyecto tuvo como objetivo estimar la dosis potencial de inhalación de PM2.5 utilizando un sensor de bajo costo en microambientes de una vivienda en Bogotá. Para ello, se estimaron las concentraciones de material particulado con una resolución temporal de 30 segundos para diferentes microambientes. Utilizando los dispositivos Airthings View Plus y AirLink de Davis Instruments, se monitorearon continuamente las concentraciones de PM2.5 en la sala, dos habitaciones y la cocina durante un período de 20 días. El análisis de datos reveló una variabilidad significativa en los niveles de PM2.5, con una concentración media de 25.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y picos de hasta 1186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las dosis de inhalación se calcularon para diferentes niveles de actividad, mostrando que incluso en reposo, la dosis potencial podría alcanzar niveles preocupantes. Las recomendaciones para reducir la exposición a PM2.5 en interiores incluyen el uso de sensores de calidad del aire, la incorporación de plantas purificadoras de aire, el empleo de filtros HEPA y la implementación de medidas preventivas como la ventilación adecuada y el mantenimiento de dispositivos de combustión. Estas estrategias tienen como objetivo promover ambientes interiores más saludables y mitigar los riesgos para la salud asociados con la inhalación de PM2.5.

Palabras clave: aire, impacto ambiental, Salud, contaminación atmosférica, vivienda

Abstract

The high concentrations of particulate matter with a diameter of 2.5 micrometers (PM_{2.5}) were, at the time, the main environmental problem in Bogotá in intramural and extramural environments, especially due to their negative impacts on the economy and health of the population. However, the high cost of measuring equipment prevented analysis at the residential level. The last project aimed to estimate the potential inhalation dose of PM_{2.5} using a low-cost sensor in microenvironments of a home in Bogotá. To do this, particulate matter concentrations were estimated with a temporal resolution of 30 seconds for different microenvironments.

Utilizing the Airthings View Plus and AirLink by Davis Instruments, PM_{2.5} concentrations were continuously monitored in the living room, two bedrooms, and the kitchen over a 20-day period. Data analysis revealed significant variability in PM_{2.5} levels, with a mean concentration of 25.0 µg/m³ and peaks up to 1186 µg/m³. The inhalation doses were calculated for different activity levels, showing that even at rest, the potential dose could reach concerning levels.

Recommendations for reducing indoor PM_{2.5} exposure include using air quality sensors, incorporating air-purifying plants, employing HEPA filters, and implementing preventive measures such as proper ventilation and maintenance of combustion devices. These strategies aim to promote healthier indoor environments and mitigate the health risks associated with PM_{2.5} inhalation.

Keywords: Air, Environmental Impact, Health, Health, Air Pollution, Air Pollution, Housing

Tabla de Contenido

Introducción	9
Planteamiento del Problema	9
Justificación	13
Objetivos	15
Objetivo General	15
Objetivos Específicos.....	15
Revisión de Literatura.....	16
Marco Teórico.....	16
Clasificación del Material Particulado	17
Dinámica de Fluidos en Interiores	19
Efectos a Largo Plazo de la Exposición a PM2.5	21
Efectos Diferenciales de la Exposición Continua a Bajos Niveles de PM2.5 Vs.	
Exposición a Altos Niveles en Breves Períodos.....	24
Comparación de efectos a largo plazo.	25
Estrategias de Mitigación y Control.	26
Normatividad Vigente Legal en Colombia para la Calidad del Aire.....	26
Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire.....	26
Normatividad Vigente Legal.....	28
Marco Conceptual.....	31
Ambiente Intramural.....	31
Contaminación Atmosférica.	31

Dosis Potencial de Inhalación.....	31
Exposición Personal a un Contaminante.....	31
Fuente de Emisión.....	31
Material Particulado.....	31
PM _{2.5}	32
Tasa de Inhalación.....	32
Metodología.....	33
Procedimiento para la Estimación y Análisis Temporal de las Concentraciones.....	34
Procedimiento para Estimación de la Dosis Potencial de Inhalación.....	35
Procedimiento para el Establecimiento de Recomendaciones.....	37
Resultados.....	38
Mediciones de Material Particulado por Microambiente.....	38
Microambiente Sala Comedor.....	39
Microambiente Habitación 1.....	41
Microambiente Habitación 2.....	44
Microambiente Cocina.....	47
Cuatro Microambientes.....	50
Tasas de Inhalación Teóricas Promedio para Determinar la Dosis Potencial de Inhalación de una Persona en Microambientes de una Vivienda en Bogotá.....	51
Resultados.....	53
Concentraciones de PM _{2.5}	54
Dosis de Inhalación.....	55

Recomendaciones Domésticas para la Reducción de la Exposición a Material Particulado	
Intramural.....	58
Infografía.....	67
Conclusiones.....	68
¿Cuál es la dosis potencial de inhalación de PM _{2,5} en los microambientes de una vivienda en Bogotá?	69
Recomendaciones	71
Referencias Bibliográficas	74

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Clasificación del Material Particulado</i>	17
Tabla 2 <i>Normatividad Vigente en Colombia para la Calidad del Aire.</i>	29
Tabla 3 <i>Tasas de inhalación por nivel de actividad.</i>	36
Tabla 4 <i>Análisis Estadístico de Concentraciones de PM2.5 en Sala-Comedor.</i>	40
Tabla 5 <i>Análisis Estadístico de Concentraciones de PM2.5, en Habitación 1.</i>	43
Tabla 6 <i>Análisis Estadístico de Concentraciones de PM2.5, en Habitación 2.</i>	46
Tabla 7 <i>Análisis Estadístico de Concentraciones de PM2.5, en Cocina.</i>	49
Tabla 8 <i>Estadísticas Descriptivas de las Concentraciones de PM2.5 y dosis potenciales de inhalación en diferentes niveles de actividad física en microambientes domésticos.</i>	54

Lista de figuras

Figura 1 <i>Serie de tiempo de concentraciones de material particulado (PM2.5) en Bogotá, medido en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.</i>	33
Figura 2 <i>Equipo de medición con sensor Sensirion STH31.</i>	35
Figura 3 <i>Concentración de PM2.5-Microambiente: Sala Comedor.</i>	39
Figura 4 <i>Concentración de PM2.5-Microambiente: Habitación 1.</i>	42
Figura 5 <i>Concentración de PM2.5-Microambiente: Habitación 2.</i>	45
Figura 6 <i>Concentración de PM2.5-Microambiente: Cocina.</i>	48
Figura 7 <i>Concentración de PM2.5, en los cuatro Microambientes.</i>	51
Figura 8 <i>Monitor de calidad del aire View Plus del fabricante Airthings.</i>	60
Figura 9 <i>Monitor de calidad del aire AirLink de Davis Instruments.</i>	61
Figura 10 <i>Uso de la aplicación móvil WeatherLink para su uso con el AirLink de Davis Instruments.</i>	61
Figura 11 <i>Filtro de fibras en un dispositivo HEPA.</i>	64
Figura 12 <i>Filtro de aire basado en la tecnología HEPA, fabricado por Xiaomi.</i>	65
Figura 13 <i>Infografía sobre Métodos de Reducción de PM2.5 en Entornos Interiores.</i>	67

Introducción

Planteamiento del Problema

La contaminación atmosférica es, en la actualidad, reconocida mundialmente como uno de los resultados más negativos asociados al crecimiento urbano por el impacto en la morbilidad y mortalidad en las sociedades. Para la Organización Mundial de la Salud (OMS), el impacto de la contaminación del aire sobre las diversas morbilidades es equiparable al del tabaquismo y la dieta no saludable (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2023). De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud, alrededor de 249 mil muertes prematuras pudieron atribuirse a la contaminación del aire exterior y 83 mil a combustibles sólidos dentro de las viviendas en 2016 (Hernández, 2021).

En el 2019, en el mundo se presentaron alrededor de 7 millones de muertes prematuras atribuibles a la contaminación del aire, del cual, el 88% de estas muertes ocurrieron en países de ingresos bajos (Hernández, 2021). De acuerdo con este último estudio, en los países de ingresos bajos y medios la contaminación atmosférica es mucho más alta, en comparación con los países con mayores ingresos económicos, debido a que estos últimos han buscado implementar con mayor eficiencia acciones que reducen la exposición a dicha contaminación (Grupo Banco Mundial, 2022). Entre las acciones llevadas a cabo por los países con mayor Producto Interno Bruto (PIB) se destacan aquellas incorporadas en sectores como industria, transporte, energía y vivienda para la adopción de alternativas sostenibles. Es decir, en sectores donde se generan las mayores participaciones en emisiones de contaminantes particulados y gaseosos (DANE, 2024).

La polución del aire tiene efectos adversos asociados a la mortalidad y las pérdidas económicas considerando el aumento en la atención de pacientes y muertes, así como disminuciones en la productividad. Según el portal especializado en calidad del Aire “IQAIR” la

mala calidad del aire impactó negativamente con un costo de más de \$80 mil millones de dólares en diversas ciudades del mundo durante el año 2020 (Gobierno CDMX, 2023). Por ejemplo, Tokio se impactó con 40.000 muertes y un costo de \$43 mil millones de dólares; para Delhi se calculan 54.000 muertes y un costo de \$8.1 mil millones de dólares. En Shanghái se presentaron 39.000 muertes y un costo de \$19 mil millones de dólares. Para ciudad de México se estima 15.000 muertes y un costo de \$8 mil millones de dólares. Por último, Sao Paulo se impactó con 15.000 muertes y un costo de \$7 mil millones de dólares (Kelly, 2023). Lo anterior puede llegar a ser mayor considerando que en múltiples ocasiones los casos de morbilidad y mortalidad atribuibles no son reportados. Esto implica la posibilidad de diversificados casos de muerte donde no se detecta el impacto o no se comprueba su asociación con la contaminación atmosférica. Esto, en parte se puede explicar por la desinformación y la carencia de información que hay sobre las condiciones del medio (Hernández, 2021).

La contaminación atmosférica no solo ha incrementado el número de casos de mortalidad, también tiene un impacto negativo en la salud pública a corto, mediano y largo plazo. Esto, induciendo la morbilidad por enfermedades relacionadas con la mala calidad del aire como la neumonía, la obstrucción crónica pulmonar, el cáncer de pulmón (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2023). Enfermedades cardiovasculares como la falla cardíaca, cuya morbilidad correlaciona con incrementos en partículas de monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno (Saavedra, 2020). Algunos estudios realizados en Colombia han demostrado la relación entre la inhalación de material particulado (PM_{10}) con morbilidades por enfermedad pulmonar obstructiva crónica, bronquitis crónica y síntomas respiratorios (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2024). Igualmente, una revisión sistemática reciente ha encontrado que la contaminación del aire también se asocia con efectos psicológicos,

tales como la disminución de la percepción de calidad de vida y satisfacción, la ansiedad, y un bajo rendimiento en el funcionamiento cognitivo y en la toma de decisiones (MinAgricultura, 2023).

Los niños son una población especialmente afectada por la contaminación atmosférica. Según el informe sobre contaminación aérea y salud infantil, la OMS asegura que la muerte de 1.7 millones de niños menores de 5 años en el mundo se relaciona con la contaminación del aire, sobre todo en ambientes intramurales (viviendas). De las 1.7 millones de muertes, 570,000 son a causa de infecciones respiratorias, principalmente por neumonía. Además, la contaminación del aire incrementa las posibilidades de desarrollar asma en más de un 33% y en un 50% la neumonía en infantes (OMS, 2018). Los niños en particular también son afectados en su desarrollo neurológico, así como en la probabilidad de desarrollo de enfermedades crónicas y asma, alteraciones vasculares y malformaciones congénitas (OMS, 2024).

Por último, es importante resaltar la importancia de las condiciones de las viviendas ya que estas pueden incrementar la probabilidad de inhalación de partículas. Por ejemplo, en viviendas con baja ventilación y diferentes fuentes de material particulado. Como se mencionó anteriormente, una proporción de las muertes está asociada a contaminación no sólo externa sino generada dentro de los mismos hogares. En el caso colombiano, los métodos de cocina doméstica tales como la cocina con biomasa (leña) y otros combustibles sólidos, son aun ampliamente extendidos, con una difusión de alrededor de 1.417.700 hogares frente al total de 13 millones de cocinas domésticas en el país (un 11% aproximadamente), seguidos por una menor proporción de hogares que utilizan carbón mineral, gasolina, kerosene, alcohol, cocinol o materiales de desecho (Alfoso, 2018).

Esto implica que la exposición a material particulado sigue generando un riesgo alto dentro de los hogares que actualmente no se contabiliza. Por lo tanto, se podría decir que es un tema relevante de investigación que no se ha explorado a profundidad. En otras palabras, no hay suficiente investigación sobre la dosis de inhalación de contaminantes como $PM_{2.5}$ en zonas de confort y refugio como las viviendas. Teniendo en cuenta lo anterior, se establece como pregunta de investigación:

¿Cuál es la dosis potencial de inhalación de $PM_{2.5}$ en los microambientes de una vivienda en Bogotá?

Justificación

El presente proyecto tiene principalmente, dos justificantes. a.) apuntar a profundizar sobre problema ambiental y de salud pública en Bogotá, y b.) la necesidad de ampliar el conocimiento sobre el comportamiento interior del material particulado. Por un lado, la mortalidad y morbilidad ocasionadas por el material particulado y su respiración en una gran variedad de ambientes humanos es un aliciente para investigar más a fondo este fenómeno, en la medida en que permita generar herramientas para el control de este fenómeno. Principalmente en países con ingresos moderados como Colombia, se justifica el desarrollo del presente proyecto orientado a estimar la dosis potencial de inhalación de $PM_{2.5}$.

En otras palabras, este proyecto aportara al entendimiento de la cantidad potencial de contaminante que una persona puede llegar a inhalar en microambientes intramurales típicos como los de una vivienda. El entendimiento del problema puede conllevar o dar paso a futuras investigaciones que busquen la reducción de la mortalidad y morbilidad por contaminación atmosférica. En segundo lugar, también permite ampliar el estado del conocimiento con respecto al comportamiento de material particulado dentro de espacios cerrados. Si bien las investigaciones citadas en el anterior aparte mencionan aspectos como la cocina tradicional en leña u otros combustibles que se utilizan (OMS, 2022). Esto aún no permite explicar lo que sucede con los hogares donde se cocina con medios más eficientes y la cocina no se convierte en un foco de dispersión de material particulado. Hasta el momento, hay pocos estudios asociados a la contaminación del aire bajo actividades en interiores tales como el trabajo en casa, el uso del tiempo libre, actividades sociales, entre otros. Esto hace que se desconozcan las implicaciones en grupos de edad tales como los niños o adultos mayores, que realizan la mayor parte de sus actividades en casa o espacios cerrados.

Por otro lado, no está claro si al encontrarse en una zona con contaminación atmosférica con material particulado hay mayor o menor riesgo para la salud de una persona si esta realiza actividades fuera de casa o dentro de esta. Colombia, en particular, pese a no ser un país industrializado, tiene problemáticas importantes en la calidad del aire. Según un estudio realizado por la universidad de los Andes, en 2021 solo el 10% de las personas en Bogotá respiraron aire de buena calidad (Ministerio de Ambiente, 2021).

A nivel nacional, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), reveló que los contaminantes con mayor problemática en el país son el material particulado, especialmente aquel cuyo tamaño es inferior a 2.5 micras (PM_{2.5}). Así las cosas, se podría inferir que la calidad del aire exterior en Colombia y en ciudades principales como Bogotá, es muy regular. El hecho que solo 10% de la población en la capital del país pueda respirar aire de mejor calidad advierte de la necesidad de ampliar el estado del conocimiento en torno al riesgo de inhalación en ambientes intramurales, considerando que estos últimos pueden aportar al aumento en las concentraciones de exposición. De lo anterior se puede inferir, que la calidad del aire exterior en Colombia y en ciudades principales como Bogotá, es muy regular. El hecho que solo 10% de la población en la capital del país pueda respirar aire de mejor calidad advierte de la necesidad de ampliar el estado del conocimiento en torno al riesgo de inhalación en ambientes intramurales.

Objetivos

Objetivo General

Estimar la dosis potencial de inhalación de $PM_{2.5}$ a partir de un sensor de bajo costo en microambientes de una vivienda en Bogotá como fundamento de promoción de ambientes sano

Objetivos Específicos

Analizar la distribución de valores asociados a las concentraciones de exposición personal a $PM_{2.5}$ a partir del uso de un sensor de bajo costo en microambientes de una vivienda.

Identificar las tasas de inhalación teóricas promedio para determinar la dosis potencial de inhalación de una persona en microambientes de una vivienda en Bogotá.

Diseñar recomendaciones a partir de los resultados encontrados para disminuir la dosis de inhalación de $PM_{2.5}$ en los microambientes analizados.

Revisión de Literatura

Marco Teórico

La contaminación intramural es contaminación atmosférica dentro de espacios cerrados, ya sea por generarse dentro del espacio o por la entrada de partículas presentes en el aire de espacios abiertos (Organización Mundial de la Salud, 2022). Esto implica que normalmente se trata de contaminación originada dentro del mismo hogar (humo de cocina en el caso de las cocinas de leña, y humo de tabaco) combinada con agentes contaminantes externos de alta probabilidad de inhalación que hay en el aire exterior (emisiones de vehículos, quemados, etc.). La contaminación intramural es un objeto de estudio no sólo de las ciencias ambientales sino de la epidemiología, en la medida en que es una condición de riesgo asociada. Como se conceptualizó anteriormente, un aumento en las concentraciones de contaminantes atmosféricos puede estar relacionado con un incremento de infecciones respiratorias y trastornos del sistema nervioso, e incluso también, de difusión radiactiva (Méndez, 2011). Igualmente, evidencia reciente sugiere que incluso la presencia de material particulado aumenta el riesgo de proliferación de organismos como *Pantoea agglomerans*, *Hafnia alvei*, *Bacillus polymixa*, *Staphylococcus aureus*, y *Staphylococcus xylosum* (Contreras & Gutiérrez, 2022).

Se entiende como contaminación intradomiciliaria el tipo de contaminación intramural que existe dentro de las residencias de los habitantes, donde normalmente no se realizan actividades de producción industrial, aunque en algunos países se encuentra extendida la cocina con leña. Normalmente, cuando se habla de contaminación intradomiciliaria la sustancia o elemento que más preocupa es el material particulado más pequeño (PM_{2.5}) (OMS, 2023). En los entornos intramurales en los que no se utiliza material de biomasa para cocinar, lo más

común es encontrar material particulado proveniente de la combustión de los vehículos (Ramírez, 2021).

La contaminación intramural se caracteriza por presentar variaciones dentro de una misma zona urbana. Dentro de los factores que pueden influir en las concentraciones se encuentra: las corrientes de aires, diferencias de altura. Así mismo, cercanía o lejanía con zonas de alto tráfico vehicular, tamaño y configuración del tejido urbanístico.

Clasificación del Material Particulado

La clasificación del material particulado en el campo de los contaminantes químicos industriales es esencial debido a sus diversos efectos en la salud de los operarios. El polvo industrial, según sus características, puede ocasionar enfermedades como la neumoconiosis o generar incomodidad en el lugar de trabajo. Su clasificación se realiza en función de su forma, tamaño, composición y efectos.

Tabla 1

Clasificación del Material Particulado

Criterio de Clasificación	Categoría	Descripción
Forma	Polvo propiamente dicho	Partícula sólida en suspensión, no en fibras.
	Fibras	Partículas mayores de 5 micras en longitud, diámetro de sección transversal menor de 3 micras, longitud mayor que la anchura.

Tamaño	Sedimentables	Tamaño entre 10 y 15 micras, se deposita rápidamente debido a su peso.
	Inhalable	Tamaño menor a 10 micras, puede afectar el sistema respiratorio.
	Respirable	Tamaño menor a 5 micras, ingresa en los pulmones.
	Visible	Tamaño mayor a 40 micras, distinguible a simple vista.
Composición	Vegetal	Incluye cereales, polen y paja.
	Animal	Hueso, pluma, cuero y pelo.
	Mineral	Asbesto, metales, etc.
Efectos	Polvo inerte	No produce alteraciones fisiológicas importantes, puede causar molestias o infecciones respiratorias benignas.
	Polvo tóxico	Tiene una acción tóxica en el organismo, ej. óxido de plomo que produce saturnismo.
	Polvo neumoconiótico	Produce alteraciones pulmonares irreversibles, ej. polvo con más de 1% de sílice libre cristalina que origina silicosis.
	Polvo cancerígeno	Produce tumores malignos, ej. asbestos, ácido crómico, arsénico, cadmio, níquel, berilio.

Nota. Se realiza una clasificación del del material particulado con mediante sus formas, tamaño, composición y efectos. Elaboración propia tomado de *Aunar esfuerzos técnicos y financieros para evaluar los componentes claves de aerosoles atmosféricos en la contaminación atmosférica*

en el Valle de Aburrá FASE II, a partir de la generación de conocimiento obtenido en un estudio de caracterización química, Londoño, G. 2019. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/CaracterizacionMaterialParticulado_FaseII.pdf.

Dinámica de Fluidos en Interiores

La dinámica de fluidos en interiores es un campo de estudio fundamental para comprender cómo los contaminantes, como el material particulado (PM2.5), se distribuyen y se comportan dentro de espacios cerrados. Esta disciplina se centra en el movimiento de los fluidos, en este caso, el aire dentro de un ambiente interior, y se rige por principios físicos complejos que, aunque pueden modelarse mediante simplificaciones, requieren un entendimiento profundo para aplicarlos efectivamente en la mejora de la calidad del aire interior (Londoño, 2019).

La hipótesis de incompresibilidad, que supone que un fluido no puede cambiar su volumen bajo presión constante, es una suposición razonable para líquidos, pero resulta limitada cuando se trata de gases. En interiores, sin embargo, podemos tratar al aire como incompresible si las variaciones de presión son mínimas, lo que facilita el uso de modelos ideales para predecir el movimiento del aire y la dispersión de contaminantes. Este enfoque permite simplificar el análisis y centrarse en los aspectos más críticos de la dinámica del flujo de aire, como la distribución de partículas en diferentes habitaciones de una vivienda (Daily & Harleman, 2018).

El rozamiento interno en un fluido, también conocido como viscosidad, es otro factor clave en la dinámica de fluidos. La viscosidad introduce esfuerzos cortantes cuando capas adyacentes de fluido se mueven una sobre la otra o cuando el fluido interactúa con obstáculos. En interiores, este fenómeno se observa cuando el aire se mueve a través de conductos de ventilación, alrededor de muebles y otros obstáculos. La comprensión de estos esfuerzos es

esencial para diseñar sistemas de ventilación eficientes que minimicen la concentración de contaminantes en zonas específicas.

Las líneas de flujo y las líneas de corriente son conceptos fundamentales en la dinámica de fluidos. Las líneas de flujo describen la trayectoria que sigue un elemento de fluido en movimiento, mientras que las líneas de corriente indican la dirección de la velocidad del fluido en cada punto. En un régimen estacionario, donde la velocidad en cada punto del espacio permanece constante en el tiempo, las líneas de corriente coinciden con las líneas de flujo. Este conocimiento es vital para el diseño de sistemas de ventilación y purificación del aire, ya que permite prever cómo se moverán los contaminantes y dónde se concentrarán (Bergadà, 2006).

El flujo laminar y el flujo turbulento representan dos tipos de movimiento del fluido con características muy diferentes. El flujo laminar es ordenado, estratificado y suave, con capas de fluido que se deslizan paralelamente sin entremezclarse. Este tipo de flujo es común a bajas velocidades o altas viscosidades y es más fácil de predecir y controlar. En contraste, el flujo turbulento es caótico y desordenado, con partículas moviéndose en trayectorias irregulares y formando pequeños remolinos. Este tipo de flujo ocurre a altas velocidades o en presencia de obstáculos abruptos y presenta mayores desafíos para la gestión de la calidad del aire interior.

La comprensión de la dinámica de fluidos es crucial para abordar problemas de contaminación del aire en interiores. Por ejemplo, en una vivienda, la cocina puede ser una fuente significativa de PM_{2.5} debido a la combustión de alimentos y el uso de estufas. El diseño de sistemas de extracción de aire que aprovechen el flujo laminar puede ayudar a reducir la dispersión de partículas a otras áreas de la casa. Asimismo, evitar la creación de condiciones que generen flujo turbulento puede minimizar la re-circulación de contaminantes en el aire interior (EPA, 2024).

Asimismo, los principios de dinámica de fluidos son aplicables en la evaluación de la eficacia de purificadores de aire y sistemas de filtración. Los purificadores de aire que utilizan filtros HEPA, por ejemplo, funcionan mejor en condiciones de flujo laminar, donde el aire se mueve de manera controlada y predecible. Entender cómo el flujo de aire interactúa con estos dispositivos permite optimizar su colocación y operación para maximizar la reducción de contaminantes.

El uso de modelos computacionales para simular el movimiento del aire y la dispersión de partículas en interiores es otra aplicación importante de la dinámica de fluidos. Estos modelos pueden prever cómo diferentes configuraciones de ventilación y obstáculos dentro de una vivienda afectarán la calidad del aire. Las simulaciones pueden ayudar a identificar áreas problemáticas y a diseñar soluciones específicas para mejorar la ventilación y reducir las concentraciones de PM_{2.5} en el aire interior (Airtécnics, 2021).

En conclusión, la dinámica de fluidos en interiores es una herramienta esencial para comprender y controlar la calidad del aire en espacios cerrados. La capacidad de modelar y predecir el movimiento del aire y la dispersión de contaminantes permite diseñar sistemas de ventilación y purificación más efectivos, lo que es crucial para reducir la exposición a contaminantes como el PM_{2.5} y mejorar la salud y el bienestar de los habitantes.

Efectos a Largo Plazo de la Exposición a PM_{2.5}

La materia particulada, conocida como PM_{2.5}, se refiere a partículas muy pequeñas en el aire con un diámetro de 2.5 micrómetros o menos, lo que es menos que el grosor de un cabello humano. Estas partículas pueden estar compuestas de sustancias químicas orgánicas, polvo, hollín y metales, y provienen de diversas fuentes como automóviles, camiones, fábricas y la

quema de madera. Debido a su diminuto tamaño, estas partículas pueden penetrar profundamente en los pulmones y, en algunos casos, llegar al torrente sanguíneo (EPA, 2024).

La inclusión de PM2.5 como un indicador en estudios ambientales como CalEnviroScreen se debe a los serios efectos que estas partículas tienen sobre la salud humana. Las partículas finas pueden desplazarse profundamente dentro de los pulmones, causando enfermedades cardíacas y pulmonares. La exposición a PM2.5 está vinculada a muertes prematuras, especialmente entre los niños, los ancianos y las personas con enfermedades crónicas como el asma y enfermedades cardíacas y pulmonares. Los datos de PM2.5 son evaluados utilizando el promedio de la concentración anual medida durante varios años, proporcionando una visión precisa del impacto de estas partículas en la salud pública (Ramírez, 2021).

La exposición a PM2.5 tiene múltiples efectos adversos sobre la salud. Estudios científicos han demostrado que estas partículas pueden causar muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, infartos de miocardio no mortales, latidos irregulares, agravamiento del asma, reducción de la función pulmonar y aumento de síntomas respiratorios como irritación en las vías respiratorias, tos y dificultad para respirar. Los grupos más vulnerables a estos efectos son los niños, los adultos mayores y las personas con condiciones cardíacas o pulmonares preexistentes (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2024).

Asimismo, de los efectos sobre la salud, PM2.5 también tiene un impacto significativo en el medioambiente. Estas partículas son la principal causa de visibilidad reducida, conocida como bruma, en muchas áreas, incluidos parques nacionales y zonas silvestres. El viento puede transportar estas partículas a largas distancias, depositándolas en el suelo y el agua, lo que puede

llevar a la acidificación de lagos y arroyos, cambios en el balance nutricional de las aguas costeras, reducción de nutrientes en el suelo, daño a bosques sensibles y cultivos agrícolas, y efectos perjudiciales sobre la diversidad de ecosistemas (Valladolid, 2024).

El daño ambiental causado por PM2.5 también incluye la contribución a la lluvia ácida, que tiene efectos devastadores sobre los ecosistemas. La sedimentación de partículas puede alterar el balance nutricional de las aguas y suelos, afectando negativamente a la flora y fauna. Esto resalta la necesidad de monitorear y regular las emisiones de PM2.5 para proteger no solo la salud humana, sino también la integridad de los ecosistemas naturales.

La medida de PM2.5 utilizada en CalEnviroScreen, que incluye datos de estaciones de monitoreo del aire en todo California, proporciona información crucial para la toma de decisiones en políticas ambientales. Este indicador ayuda a identificar áreas con alta concentración de partículas finas y a implementar estrategias para reducir la exposición de la población. Es fundamental que los gobiernos y las comunidades trabajen juntos para mejorar la calidad del aire y mitigar los efectos negativos de PM2.5 (Greentology, 2023).

En conclusión, la exposición a PM2.5 tiene efectos graves y duraderos tanto en la salud humana como en el medioambiente. La comprensión de estos efectos y la implementación de medidas para controlar y reducir la emisión de estas partículas son esenciales para proteger la salud pública y preservar los ecosistemas. Es imperativo continuar con la investigación y la aplicación de políticas efectivas para abordar este problema crítico de contaminación del aire.

Efectos Diferenciales de la Exposición Continua a Bajos Niveles de PM2.5 Vs.

Exposición a Altos Niveles en Breves Períodos. La materia particulada fina (PM2.5) representa uno de los contaminantes más perjudiciales para la salud humana debido a su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio. Estudios recientes han comenzado a diferenciar entre los efectos de la exposición continua a bajos niveles de PM2.5 y la exposición a altos niveles en breves períodos, revelando que ambos escenarios pueden tener impactos significativos, aunque distintos, sobre la salud.

La exposición continua a bajos niveles de PM2.5, común en muchos ambientes cerrados como oficinas y hogares, puede parecer menos alarmante que los picos de alta contaminación. Sin embargo, esta exposición crónica puede conducir a una acumulación de partículas en los pulmones y otros órganos, resultando en efectos adversos a largo plazo. Estudios han demostrado que la exposición prolongada a niveles moderados de PM2.5 puede provocar inflamación crónica en los pulmones, aumentando el riesgo de enfermedades respiratorias como la bronquitis crónica y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC).

Además, la exposición continua a bajos niveles de PM2.5 también se ha asociado con un incremento en la incidencia de enfermedades cardiovasculares. La inflamación sistémica y el estrés oxidativo causados por la inhalación de estas partículas pueden contribuir al desarrollo de aterosclerosis, hipertensión y otros problemas cardiovasculares. Incluso en niveles considerados seguros, la exposición prolongada puede tener efectos acumulativos que incrementan el riesgo de eventos cardíacos a lo largo del tiempo.

Por otro lado, la exposición a altos niveles de PM2.5 durante breves períodos, aunque menos frecuente, puede desencadenar efectos agudos más inmediatos y severos. Estas exposiciones, que suelen ocurrir durante eventos de contaminación extrema como incendios

forestales, episodios de alta emisión industrial o tráfico intenso, pueden causar exacerbaciones rápidas de enfermedades respiratorias y cardiovasculares preexistentes. En individuos vulnerables, como niños, ancianos y personas con afecciones crónicas, estos picos pueden resultar en hospitalizaciones y, en casos extremos, muerte prematura.

Los efectos agudos de la exposición a altos niveles de PM2.5 incluyen ataques de asma, infecciones respiratorias y disminución rápida de la función pulmonar. La inhalación de grandes cantidades de partículas en un corto período puede superar la capacidad del sistema inmunológico para manejarlas, provocando una respuesta inflamatoria severa y daño tisular. Además, los altos niveles de PM2.5 pueden inducir arritmias cardíacas y otros problemas cardiovasculares agudos, particularmente en individuos con condiciones subyacentes.

Comparación de efectos a largo plazo. La comparación entre los efectos de la exposición continua a bajos niveles de PM2.5 y los de la exposición a altos niveles en breves períodos revela diferencias importantes. Mientras que la exposición continua tiende a causar problemas crónicos y degenerativos, la exposición aguda a altos niveles puede desencadenar eventos de salud críticos inmediatos. Sin embargo, ambos tipos de exposición contribuyen al aumento de la morbilidad y mortalidad en la población expuesta.

Estudios epidemiológicos han mostrado que incluso en áreas con buena calidad del aire, la población sigue siendo vulnerable a los efectos de la exposición prolongada a bajos niveles de PM2.5. Estos estudios sugieren que no existe un umbral seguro de exposición y que cualquier cantidad de PM2.5 puede ser perjudicial con el tiempo. Por lo tanto, las políticas de salud pública deben considerar no solo los eventos de contaminación extrema, sino también la calidad del aire en el día a día.

Estrategias de Mitigación y Control. Para abordar los efectos tanto de la exposición continua a bajos niveles de PM2.5 como de los picos agudos, es crucial implementar estrategias de mitigación y control adecuadas. En ambientes cerrados, la instalación de sistemas de filtración de aire de alta eficiencia (HEPA) puede ayudar a reducir las concentraciones de PM2.5. Además, fomentar el uso de tecnologías limpias y la reducción de emisiones en fuentes móviles y fijas contribuye a mejorar la calidad del aire tanto interior como exterior.

Es también esencial aumentar la conciencia pública sobre los riesgos asociados con la exposición a PM2.5 y promover prácticas que minimicen la exposición. Esto incluye la ventilación adecuada de los espacios interiores, la reducción del uso de combustibles fósiles en calefacción y cocina, y la adopción de hábitos saludables como evitar fumar en interiores.

En conclusión, tanto la exposición continua a bajos niveles de PM2.5 como la exposición a altos niveles en breves períodos tienen efectos perjudiciales significativos sobre la salud. La exposición crónica puede llevar a enfermedades respiratorias y cardiovasculares degenerativas, mientras que la exposición aguda puede desencadenar eventos críticos inmediatos. Por lo tanto, es crucial implementar estrategias de mitigación y control, tanto a nivel individual como comunitario, para reducir la carga de PM2.5 y proteger la salud pública. La comprensión y acción sobre estos dos tipos de exposición permitirán desarrollar políticas de salud más efectivas y un entorno más seguro y saludable para todos.

Normatividad Vigente Legal en Colombia para la Calidad del Aire

Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire

La contaminación del aire en Colombia es un problema creciente, exacerbado por las emisiones tanto naturales como humanas. Las principales fuentes de emisiones en áreas urbanas son los vehículos y las industrias, que contribuyen significativamente a la mala calidad del aire.

Para 2050, se estima que la población urbana de Colombia superará los 52 millones de habitantes, lo que incrementará aún más la demanda sobre estos servicios y, consecuentemente, las emisiones. En ciudades como Bogotá y Medellín, los vehículos son responsables del 78% y 81% de las emisiones de partículas, respectivamente, lo que se agrava debido a las condiciones geográficas y climáticas que limitan la dispersión de contaminantes, especialmente durante los periodos de alta nubosidad y transición entre estaciones.

Los efectos negativos de la contaminación del aire sobre la salud pública y la economía son significativos. La exposición continua a niveles elevados de contaminantes genera enfermedades respiratorias y cardiovasculares, restringe la actividad diaria de la población, aumenta la demanda sobre el sistema de salud y provoca muertes prematuras. En términos económicos, los costos asociados a estos efectos se estiman en 12,3 billones de pesos, lo que representa el 1,5% del PIB de 2015. Estos costos subrayan la necesidad urgente de implementar políticas eficaces para mejorar la calidad del aire y reducir la carga económica y sanitaria que la contaminación impone sobre el país (OMS, 2022).

En respuesta a esta problemática, la política CONPES 3943 de 2018 propone una serie de acciones concretas para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire. Entre estas acciones se destacan la renovación y modernización del parque automotor, la reducción del contenido de azufre en los combustibles, la adopción de mejores técnicas y prácticas en la industria, la optimización de la gestión de la información, el fomento de la investigación, el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo por contaminación del aire. Estas medidas buscan no solo disminuir las emisiones sino también mejorar la capacidad de respuesta y adaptación a los episodios críticos de contaminación.

Para implementar estas acciones, se requiere una articulación intersectorial efectiva que involucre a diversas entidades gubernamentales. Entre los actores clave se encuentran el Ministerio de Transporte, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, el Ministerio de Salud y Protección Social, el Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, la Unidad de Planeación Minero-Energética y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. La colaboración entre estos organismos es fundamental para asegurar la coherencia y efectividad de las políticas y acciones propuestas.

El desarrollo de las acciones contempladas en esta política tiene un valor indicativo cercano a los 16.637 millones de pesos para los próximos siete años. Este horizonte temporal busca la consecución de los objetivos planteados, alineando esfuerzos y recursos para enfrentar de manera integral el reto del mejoramiento de la calidad del aire. La implementación de esta política no solo contribuirá a reducir las emisiones y mejorar la salud pública, sino que también fomentará un desarrollo urbano más sostenible y resiliente, beneficiando a las generaciones presentes y futuras en Colombia (CONPES 3943, 2018).

Normatividad Vigente Legal

En Colombia, la regulación de la calidad del aire está enmarcada dentro de una serie de normas y políticas que buscan controlar y reducir la contaminación atmosférica, protegiendo así la salud pública y el medioambiente. A continuación, se detallan algunas de las principales normativas vigentes:

Tabla 2

Normatividad Vigente en Colombia para la Calidad del Aire.

Norma	Descripción	Año
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA), estableciendo principios generales para la protección del medioambiente y la calidad del aire.	1993
Decreto 948 de 1995	Regula la protección del aire y el control de la contaminación atmosférica, estableciendo límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para diferentes fuentes.	1995
Resolución 2254 de 2017	Establece los niveles de calidad del aire y los valores límites para contaminantes atmosféricos, alineándose con las recomendaciones de la OMS.	2017
Decreto 1076 de 2015	Compila y actualiza la normativa ambiental en Colombia, incluyendo disposiciones sobre la gestión de la calidad del aire y la evaluación del impacto ambiental.	2015
Resolución 610 de 2010	Fija los valores límites permisibles de contaminantes como PM10, PM2.5, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono, y define procedimientos de monitoreo.	2010

Norma	Descripción	Año
Plan Nacional de Calidad del Aire (CONPES 3943 de 2018)	Presenta las estrategias y acciones para mejorar la calidad del aire en el país, incluyendo medidas para la modernización del parque automotor y la implementación de tecnologías limpias.	2018
Resolución 650 de 2010	Reglamenta los planes de descontaminación del aire en zonas con problemas críticos de calidad del aire, estableciendo requisitos para su elaboración y seguimiento.	2010
Decreto 2041 de 2014	Regula el otorgamiento de licencias ambientales para proyectos con impactos significativos en el medioambiente, incluyendo la calidad del aire, y establece procedimientos de seguimiento.	2014

Fuente. Elaboración propia.

La normatividad vigente en Colombia establece un marco robusto para la protección de la calidad del aire, centrado en la reducción de emisiones y la promoción de prácticas sostenibles. La efectiva implementación y cumplimiento de estas normativas son esenciales para asegurar un aire más limpio y saludable para la población y para la preservación del medioambiente.

Marco Conceptual

Ambiente Intramural. El ambiente intramural corresponde a las moléculas de aire que se encuentran dentro de un recinto cerrado, como una casa, oficina o planta. Se caracteriza por un intercambio gaseoso limitado con el ambiente exterior (Agudelo-Calderón et al., 2016).

Contaminación Atmosférica. La contaminación atmosférica es la presencia en el aire de productos gaseosos. Dichos productos o partículas gaseosas pueden ser molesto para las personas a su alrededor y puede representar un daño importante para personas, plantas y animales (IDEAM, 2019).

Dosis Potencial de Inhalación. La dosis potencial de inhalación es la cantidad de un compuesto químico, que entra en contacto con el organismo humano, bien sea por inhalación, consumo o aplique en la piel (González Hernández, 2019).

Exposición Personal a un Contaminante. Es cuando un individuo se expone a una sustancia química que representa un riesgo para su salud (Pérez, 2005).

Fuente de Emisión. Esta se domina como la fuente de emisión de una determinada sustancia o cosa, es decir el origen de esa emisión. Normalmente se produce por la quema de combustibles fósiles que normalmente los vehículos automotores se consideran como los principales emisores de contaminantes como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, entre otros (IDEAM 2019).

Material Particulado. Según la agencia de protección ambiental de estados unidos PM es material particulado, es una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que estas presentes en el aire. Ejemplo de estas son el polvo, la suciedad y el humo (IDEAM, 2019).

PM_{2.5}. Estas son partículas inhalables, que cuentan con tamaños iguales e inferiores a los 2.5 micrómetros, usualmente de materiales con algún grado de toxicidad para el individuo examinado (IDEAM, 2019).

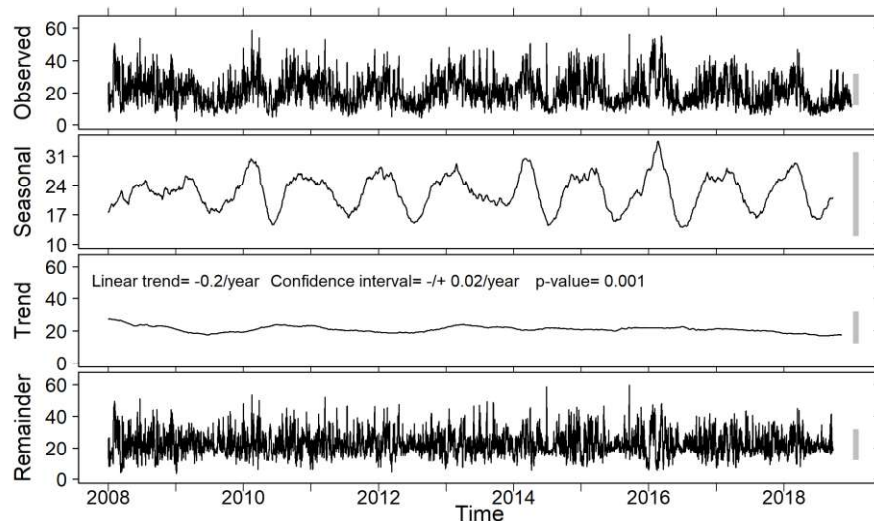
Tasa de Inhalación. Frecuencia con la que un material potencialmente riesgoso es inhalado por un individuo expuesto a un contaminante (Kawahara et al. 2012).

Metodología

La presente investigación es de tipo cuantitativa, ya que buscaba recoger y analizar datos observacionales de carácter ambiental (Mihelcic & Zimmerman, 2011). Asimismo, este estudio puede catalogarse como descriptivo, ya que se limitó a generar análisis descriptivos sin comprometerse a encontrar relaciones o predicciones de variables (Crabtree & Miller, 1992). Como se mencionó en secciones anteriores, las concentraciones de exposición podían ser influenciadas por las concentraciones ambientales. En el caso de Bogotá, las concentraciones ambientales hacían referencia a los valores reportados por la Secretaría Distrital de Ambiente. La figura 1 mostraba las concentraciones promedio de PM_{2.5} de Bogotá en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ según un estudio realizado entre 2008 y 2018 (Mendez Espinosa et al. 2019). Los resultados sugerían que las concentraciones ambientales en Bogotá presentaban un comportamiento esperado, donde las concentraciones más altas se presentaban entre diciembre y abril, mientras que las concentraciones más bajas se presentaban generalmente a mitad de año (exceptuando los eventos de intrusión de polvo del Sahara). Con esto en mente, se llevó a cabo la medición de concentraciones de exposición intramural durante el periodo de bajas concentraciones ambientales para reducir su influencia.

Figura 1

Serie de tiempo de concentraciones de material particulado (PM_{2.5}) en Bogotá, medido en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Nota. En la figura se observa el material particulado en Bogotá en un periodo de 10 años (2008-2018). Tomado de *El papel de la epidemiología ambiental en el desarrollo disciplinar de la epidemiología*, Méndez, F., 2011.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-95342011000300003

Esta investigación de carácter exploratorio buscó analizar cuantitativamente la dosis de inhalación del PM_{2.5} en microambientes de una vivienda en Bogotá (garaje, cuarto, baño, comedor, cocina). Se estimaron las concentraciones de exposición personal, las cuales fueron multiplicadas por una tasa de inhalación teórica para obtener la dosis de inhalación del contaminante, considerando el tiempo promedio de permanencia de una persona por microambiente.

Procedimiento para la Estimación y Análisis Temporal de las Concentraciones

Se estimaron las concentraciones de exposición personal a partir de un sensor de bajo costo (Figura 2). El equipo de bajo costo cuenta con un sensor de material particulado SPS30 sensirion (Sensirion, 2022). El SPS30 de Sensirion es un dispositivo que registra concentración de material particulado en PM₁, PM_{2.5}, PM₄ y PM₁₀. Para PM_{2.5} tiene una sensibilidad de

concentraciones de 0 a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y para PM_{10} puede registrar concentraciones de 100 a 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos con un margen de error de $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tiene una vida útil de >10 años asumiendo un tiempo de operación de 24h, y en actividad consume entre 45 a 65mA a un voltaje de 5.5V.

A la vez, este se acompañó de un sensor de temperatura y humedad denominado Sensirion STH31, y una pantalla OLED 0.66 pulgadas de 64x48 píxeles (Sensirion, 2022), el cual permitió controlar las variables temperatura-humedad. Se obtuvieron datos con una resolución temporal de 1 segundo para diferentes microambientes, y una ventana de resolución temporal de publicación de 1 minuto. Cada microambiente se analizó durante 3 días. El sensor de bajo costo se obtuvo gracias al proyecto Aire Ciudadano.

Figura 2

Equipo de medición con sensor Sensirion STH31.



Fuente. Elaboración propia.

Procedimiento para Estimación de la Dosis Potencial de Inhalación

La dosis de inhalación de $\text{PM}_{2.5}$ por microambiente puede ser estimada matemáticamente por medio de un cálculo con base sumatoria a través de la fórmula siguiente como:

$$D_m^{PM_{2.5}} = \Delta t * \sum C_m^{PM_{2.5}} * TI_m$$

Donde,

$D_m^{PM_{2.5}}$ = Dosis de $PM_{2.5}$ por microambiente ($\mu\text{g}/\text{día}$).

Δt = Instancia de tiempo registrada (0.02 min) ($\text{min}/\text{día}$).

$C_m^{PM_{2.5}}$ = concentración de $PM_{2.5}$ en el microambiente cada segundo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

TI_m = tasa de inhalación generalizado en microambientes (m^3/min).

Las tasas de inhalación promedio a considerar (Tabla 1) se establecieron para el grupo de edad entre 61 y menos de 71 años de acuerdo con el “Exposure Factors Handbook”, capítulo 6 – “Inhalation Rates” de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency EPA, 2011). Debido a que los grupos de edad son diferentes, es posible que se produzcan cambios y variaciones en estas tasas de referencia.

Tabla 3

Tasas de inhalación por nivel de actividad.

Nivel de actividad	Tasa de inhalación (m^3/min)
Reposo	5.2×10^{-3}
Sedentario	4.9×10^{-3}
Suave	1.2×10^{-2}
Moderado	2.6×10^{-2}
Vigoroso	4.7×10^{-2}

Fuente. Elaboración propia.

Por último, se realizó un análisis inferencial a través de pruebas estadísticas. Las pruebas

estadísticas se corrieron a través del lenguaje de programación estadístico R. Para ello, se determinó si los datos de material particulado seguían una distribución normal a partir de la prueba de Shapiro-Wilk. Una vez que esto se realizó, se utilizó ANOVA si la distribución resultó comportarse normalmente; caso contrario, se utilizó la prueba Kruskal Wallis.

Procedimiento para el Establecimiento de Recomendaciones

A partir del análisis estadístico de la dosis de inhalación de PM_{2.5} en los diferentes microambientes considerados, se generaron recomendaciones de reducción. Para lo anterior, se consideró literatura científica y la oferta actual en el mercado. Se incluyeron sugerencias en la adquisición de sensores para monitorear los niveles de material particulado en el hogar, así como criterios para la toma de decisiones, como cambios en equipos de cocción de alimentos, incorporación de purificadores de aire, entre otros.

Resultados

Mediciones de Material Particulado por Microambiente

En el marco del objetivo específico de analizar la distribución de valores asociados a las concentraciones de exposición personal a PM2.5 en microambientes residenciales, se emprenderá un estudio detallado centrado en la variación de estas concentraciones a lo largo del tiempo y en diferentes áreas de una vivienda. Este análisis, basado en datos recopilados mediante un sensor de bajo costo, busca arrojar luz sobre los patrones de exposición a partículas finas en distintas zonas de la vivienda, identificando posibles fuentes y variaciones temporales.

El conjunto de datos utilizado abarca desde el 7 hasta el 27 de febrero, dividido en cuatro segmentos correspondientes a diferentes microambientes: sala-comedor, habitación 1, habitación 2 y cocina. Cada segmento temporal está asociado a un área específica de la vivienda, proporcionando una visión detallada de las concentraciones de PM2.5 en cada espacio.

A continuación, se realizará un análisis detallado de cada microambiente por separado, explorando estadísticas descriptivas clave como la media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y cuartiles. Posteriormente, se consolidarán estos hallazgos en una representación gráfica general que permita visualizar las variaciones a lo largo de todo el período analizado.

Este enfoque integral permitirá una comprensión más completa de la exposición a PM2.5 en el entorno residencial, identificando posibles áreas de preocupación y estableciendo una base para recomendaciones específicas destinadas a mejorar la calidad del aire en microambientes específicos. A continuación, se procederá con el análisis detallado de cada microambiente, utilizando las directrices previamente establecidas.

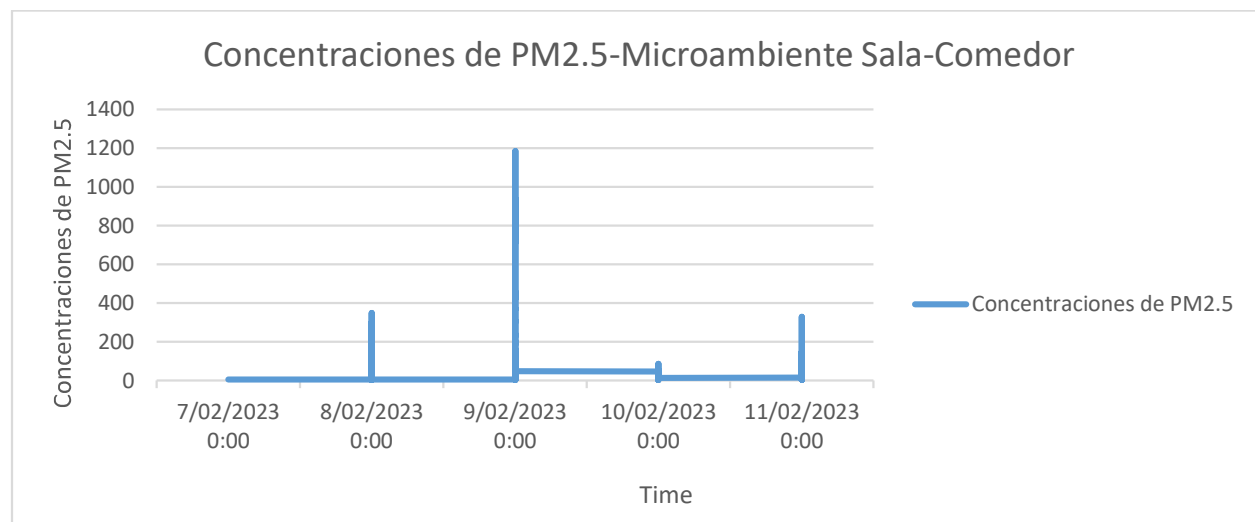
Microambiente Sala Comedor

Rango de medición: 7/2/2023 22:06:00 - 11/2/2023 22:04:00.

La figura 3, presenta un histograma detallado que ilustra la distribución de las concentraciones de PM2.5 en el microambiente de Sala-Comedor, recopiladas a través de un sensor de bajo costo durante el periodo de medición del 7/2/2023 al 11/2/2023. Este tipo de representación gráfica proporciona una visión visual de la frecuencia con la que se alcanzan diferentes niveles de concentración, permitiendo una comprensión más profunda de la variabilidad de la calidad del aire en este espacio específico.

Figura 3

Concentración de PM2.5-Microambiente: Sala Comedor.



Fuente. Elaboración propia.

Durante el intervalo del 9 de febrero de 2023, entre las 19:16 y las 19:40, se observa una serie de concentraciones extremadamente elevadas de PM2.5 en el microambiente de Sala-Comedor. El punto más crítico se registra a las 19:20, con una concentración máxima de 1186

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de otras mediciones significativas que oscilan entre 398 y 285 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores excepcionalmente altos indican un evento de contaminación notable y representan un riesgo sustancial para la salud, ya que superan significativamente las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud para concentraciones anuales de PM2.5.

Este patrón de concentraciones elevadas se extiende durante varios minutos, destacando la persistencia del evento y la necesidad urgente de tomar medidas correctivas. La presencia de estos picos extremos subraya la importancia de implementar estrategias efectivas para reducir la exposición, como limitar el tiempo en el área durante estos eventos, utilizar purificadores de aire y mejorar la ventilación.

Tabla 4

Análisis Estadístico de Concentraciones de PM2.5 en Sala-Comedor.

Medida	Valor	Interpretación
Media	21.4	La media de 21.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indica una concentración moderada de PM2.5 en el microambiente. La OMS recomienda un límite anual de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5.
Mediana	8.0	La mediana de 8.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sugiere que la mitad de las mediciones fueron inferiores a 8.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la otra mitad superiores.
Desviación estándar	55.76	La alta desviación estándar (55.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) indica una gran variabilidad en las concentraciones de PM2.5.
Mínimo	1	El mínimo de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el máximo de 1186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ muestran un rango extremo de valores.
Máximo	1186	

Fuente. Elaboración propia.

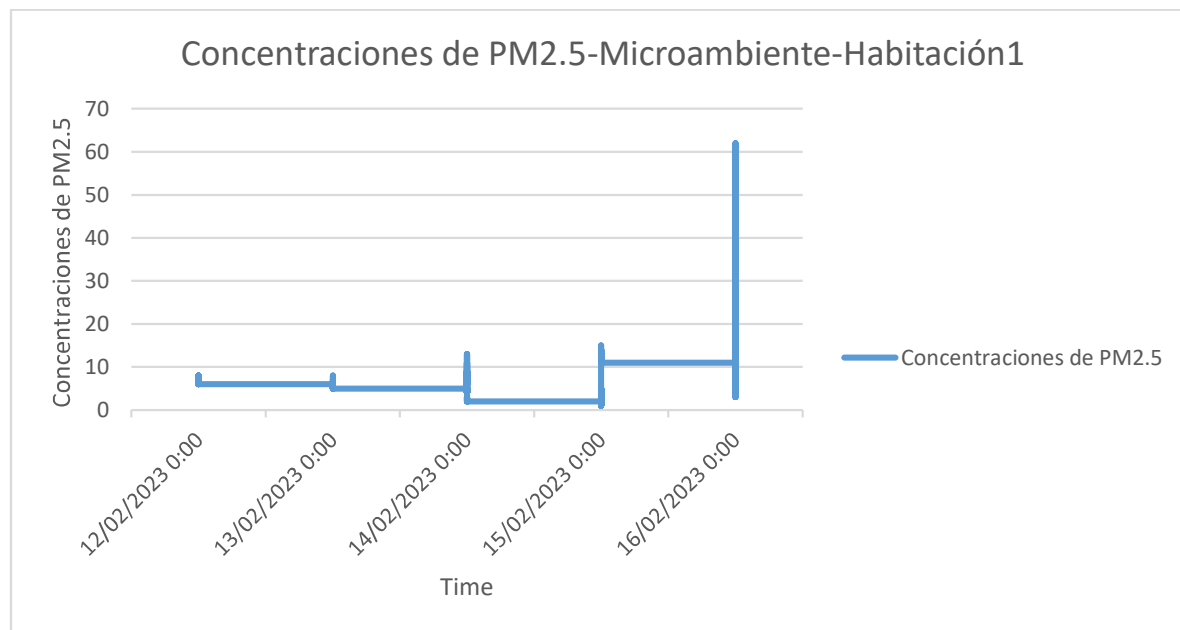
La tabla 4, revela las concentraciones de PM_{2.5} en el microambiente de Sala-Comedor, la media de 21.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indica una concentración moderada, pero la variabilidad es evidente con una desviación estándar significativa de 55.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores, combinados con la mediana de 8.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sugieren una distribución asimétrica, con un sesgo hacia concentraciones más altas. El rango extremo, desde 1 hasta 1186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, refleja la presencia de eventos inusuales que merecen una atención detallada. Los picos entre 402 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 9/2/2023 son extremadamente altos y representan un grave riesgo para la salud.

Microambiente Habitación 1

Se examinan los datos de concentración de PM_{2.5} en la Habitación-1, con un total de 2247 mediciones. Se prestará especial atención a los picos de concentración, que pueden tener un impacto significativo. La figura 4, revela que los picos de concentración, especialmente los registrados el 16 de febrero de 2023 entre las 07:18 y las 07:50, presentan una distribución caracterizada por valores significativamente elevados. Estos momentos específicos muestran concentraciones que superan la media, indicando eventos de contaminación destacados. La frecuencia de ocurrencia de valores más bajos, evidenciada en la parte izquierda del histograma, contrasta con estos picos agudos.

Figura 4

Concentración de PM2.5-Microambiente: Habitación 1.



Fuente. Elaboración propia.

El análisis estadístico de las concentraciones de PM2.5 en el microambiente de Habitación-1 proporciona una visión cuantitativa esencial para comprender la distribución y variabilidad de estos valores. Con datos recopilados durante el período especificado, se explorarán la media, la mediana, la desviación estándar, el mínimo y el máximo para obtener una comprensión detallada de las características de las concentraciones de PM2.5 en este espacio.

En la tabla 3, se evidencia que, a concentración media de $7.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sugiere que, en promedio, el microambiente se mantiene dentro de límites aceptables según las recomendaciones de la OMS. Sin embargo, la presencia de un valor máximo de $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indica la posibilidad de eventos de contaminación puntuales y resalta la importancia de analizar detalladamente estos casos extremos.

Tabla 5*Análisis Estadístico de Concentraciones de PM2.5, en Habitación 1.*

Medida	Valor	Interpretación
Media	21.4	La media de 7.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indica una concentración moderada de PM2.5 en la Habitación-1, por encima del límite anual recomendado por la OMS de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
Mediana	8.0	La mediana de 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sugiere que la mitad de las mediciones fueron inferiores a 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la otra mitad superiores.
Desviación estándar	55.76	La desviación estándar de 7.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indica una variabilidad moderada en las concentraciones de PM2.5, lo que significa que la calidad del aire puede variar considerablemente a lo largo del tiempo.
Mínimo	1	El mínimo de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el máximo de 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es extremadamente alto y representa un grave riesgo para la salud.
Máximo	1186	

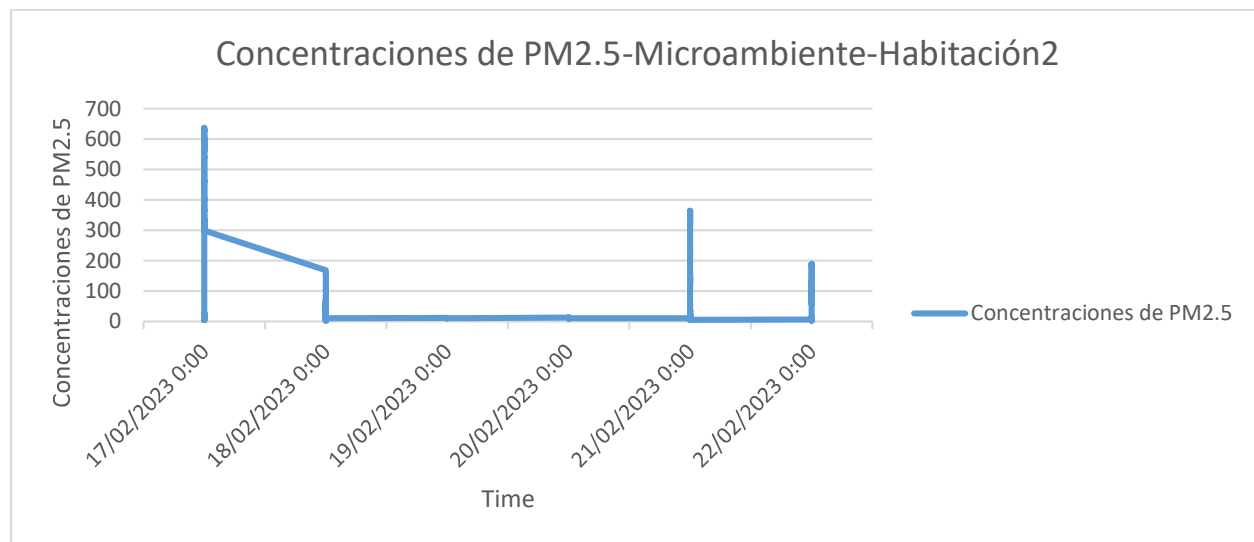
Fuente. Elaboración propia.

Se aconseja ventilar la habitación con aire fresco durante períodos de bajos niveles de PM2.5, utilizar un purificador de aire con filtro HEPA, realizar limpiezas regulares para eliminar polvo y alérgenos, y evitar actividades generadoras de partículas finas, como cocinar a fuego alto o usar velas. Es esencial monitorear continuamente la calidad del aire en la habitación, evaluando la eficacia de las medidas implementadas, y se considera la adquisición de un monitor de calidad del aire con mayor precisión para obtener datos más detallados y garantizar un ambiente interior saludable.

Microambiente Habitación 2

El análisis del comportamiento de las concentraciones de PM2.5 en Habitación-2 revela una variabilidad significativa en los datos recopilados. Se observa que el microambiente experimentó picos notables, siendo los más elevados alrededor de las 19:46 del 17/2/2023, con una concentración de 629 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de picos continuos hasta las primeras horas del 18/2/2023. Posteriormente, se identifican fluctuaciones en los niveles de PM2.5, con algunos descensos notables, como se evidencia en la muestra registrada a las 15:40 del 18/2/2023 con una concentración de 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la figura 5, se presentan los datos mediante un histograma permitirá visualizar de manera más clara la distribución de las concentraciones y destacar los momentos de mayor riesgo para la salud en el microambiente. Es crucial observar cómo han evolucionado las concentraciones a lo largo del tiempo y entender los factores que podrían haber contribuido a los picos extremos, como actividades específicas, fuentes de contaminación o cambios en la ventilación.

Figura**5***Concentración de PM2.5-Microambiente: Habitación 2.*

Fuente. Elaboración propia.

El análisis temporal revela una variabilidad sustancial en las concentraciones de PM2.5 a lo largo del periodo registrado en Habitación-2. Se destacan intervalos con valores moderados (entre 3 µg/m³ y 59 µg/m³) y otros con concentraciones notoriamente elevadas (superiores a 100 µg/m³). Comprender las causas de esta variabilidad es esencial, y se sugiere realizar un análisis detallado de las actividades y eventos que tuvieron lugar en la habitación durante esos periodos.

La tabla 6, identifican las tendencias significativas, en donde, la media de concentración de PM2.5 en Habitación-2, registrada en 42.2 µg/m³, indica un nivel moderadamente elevado, lo cual sugiere una presencia constante de partículas finas en el aire. Sin embargo, es crucial destacar la alta desviación estándar de 89.54 µg/m³, indicando una variabilidad significativa en las mediciones. Este factor resalta la existencia de picos extremadamente altos, como evidenciado por el valor máximo de 637 µg/m³, lo cual es alarmante y puede tener implicaciones adversas para la salud respiratoria.

Tabla 6*Análisis Estadístico de Concentraciones de PM2.5, en Habitación 2.*

Medida	Valor	Interpretación
Media	21.4	La media de 42.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indica una concentración moderada de PM2.5 en la Habitación-2, por encima del límite anual recomendado por la OMS de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
Mediana	8.0	La mediana de 10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sugiere que la mitad de las mediciones fueron inferiores a 10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la otra mitad superiores.
Desviación estándar	55.76	La desviación estándar de 89.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indica una variabilidad extrema en las concentraciones de PM2.5, lo que significa que la calidad del aire puede ser muy impredecible.
Mínimo	1	El mínimo de 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es un valor bajo, pero no representa la calidad del aire la mayor parte del tiempo y el máximo de 637 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es un valor extremadamente alto y representa un grave riesgo para la salud.
Máximo	1186	

Fuente. Elaboración propia.

La mediana de 10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ muestra que la mitad de las mediciones se sitúan por debajo de este umbral, evidenciando la presencia de periodos con concentraciones más bajas, pero no refleja completamente la magnitud de los picos extremos. Este contraste entre la media y la mediana subraya la importancia de abordar no solo la tendencia central, sino también la variabilidad extrema en las concentraciones.

El valor mínimo de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sugiere la existencia de periodos con concentraciones relativamente bajas, lo cual es alentador. Sin embargo, la presencia de valores tan dispares, desde mínimos hasta picos extremadamente altos, indica la necesidad de investigar y abordar las fuentes específicas de contaminación. La amplia gama de concentraciones observadas en Habitación-2 resalta la complejidad del ambiente y la importancia de implementar estrategias efectivas para mantener niveles de $\text{PM}_{2.5}$ dentro de límites aceptables.

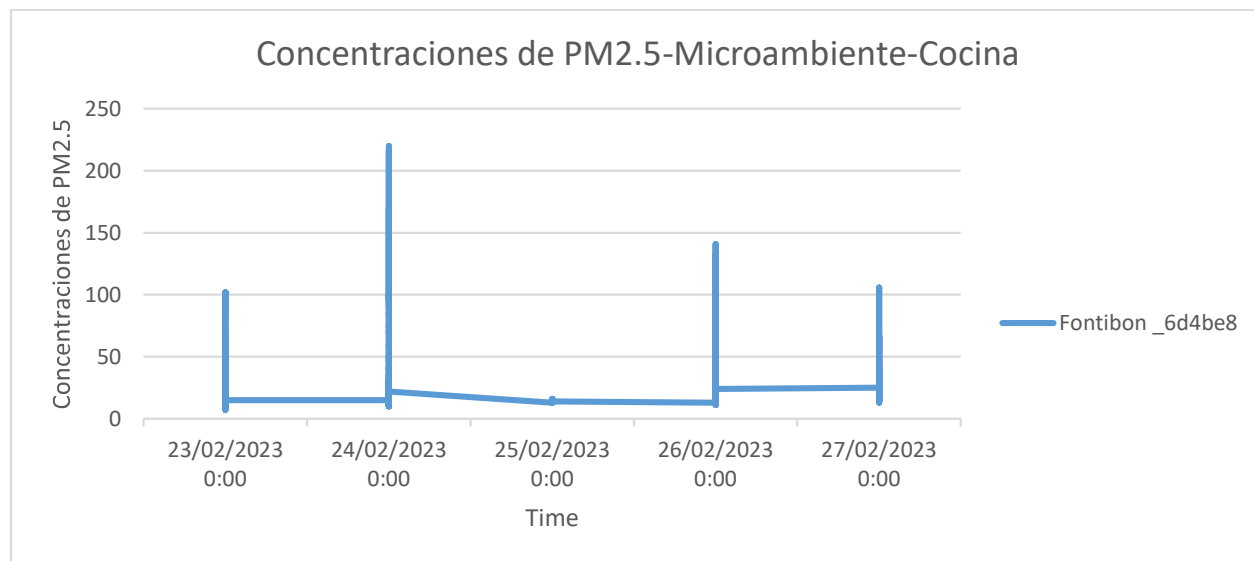
Microambiente Cocina

Las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en el microambiente de la cocina, totalizando 2864 registros. Se observan fluctuaciones significativas en los niveles de partículas a lo largo del tiempo. Se destacan algunos picos notables, como el registrado el 23/2/2023 a las 09:22, alcanzando los $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este evento se repite a las 09:24, y ambos momentos merecen especial atención en el análisis.

Asimismo, se evidencian otras variaciones notables, lo cual se refleja en la figura 6, reflejando el aumento de las concentraciones el 24/2/2023 a las 13:30, alcanzando los $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de un pico extraordinario de $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 13:34. Si bien estos valores pueden parecer positivos, podrían indicar un mal funcionamiento del monitor o una ventilación excesiva que puede afectar la salud.

Figura 6

Concentración de PM2.5-Microambiente: Cocina.



Fuente. Elaboración propia.

La evolución temporal revela un comportamiento variable con episodios de concentraciones más elevadas intercalados con periodos de niveles más bajos. Es crucial analizar las circunstancias asociadas a los momentos de incremento, como la realización de actividades específicas o cambios en la ventilación. Este análisis permitirá identificar patrones y adoptar medidas adecuadas para mantener un ambiente seguro y saludable en la cocina.

La tabla 8, presenta el análisis estadístico del microambiente de la cocina, este análisis arroja información valiosa sobre las concentraciones de PM2.5. La media de 25.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indica un nivel intermedio de exposición, mientras que la mediana de 20.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sugiere una distribución algo sesgada hacia valores más bajos. La desviación estándar de 17.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ señala una variabilidad moderada en los datos, indicando que las concentraciones tienden a fluctuar alrededor de la media.

El rango de concentraciones es considerable, desde un mínimo de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta un máximo de $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este rango amplio refleja la diversidad de situaciones en las que se registraron concentraciones extremas. El mínimo de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indica momentos de buena calidad del aire, mientras que el máximo de $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ destaca eventos excepcionales que deben investigarse a fondo.

Tabla 7

Análisis Estadístico de Concentraciones de PM2.5, en Cocina.

Medida	Valor	Interpretación
Media	21.4	La media de $25.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indica una concentración moderada de PM2.5 en la cocina, por encima del límite anual recomendado por la OMS de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
Mediana	8.0	La mediana de $20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sugiere que la mitad de las mediciones fueron inferiores a $20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la otra mitad superiores.
Desviación estándar	55.76	La desviación estándar de $17.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indica una variabilidad considerable en las concentraciones de PM2.5, lo que significa que la calidad del aire puede ser muy impredecible.
Mínimo	1	El mínimo de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es un valor bajo, pero no representa la calidad del aire la mayor parte del tiempo. El máximo de $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es un valor extremadamente alto y representa un grave riesgo para la salud.
Máximo	1186	

Fuente. Elaboración propia.

Cuatro Microambientes

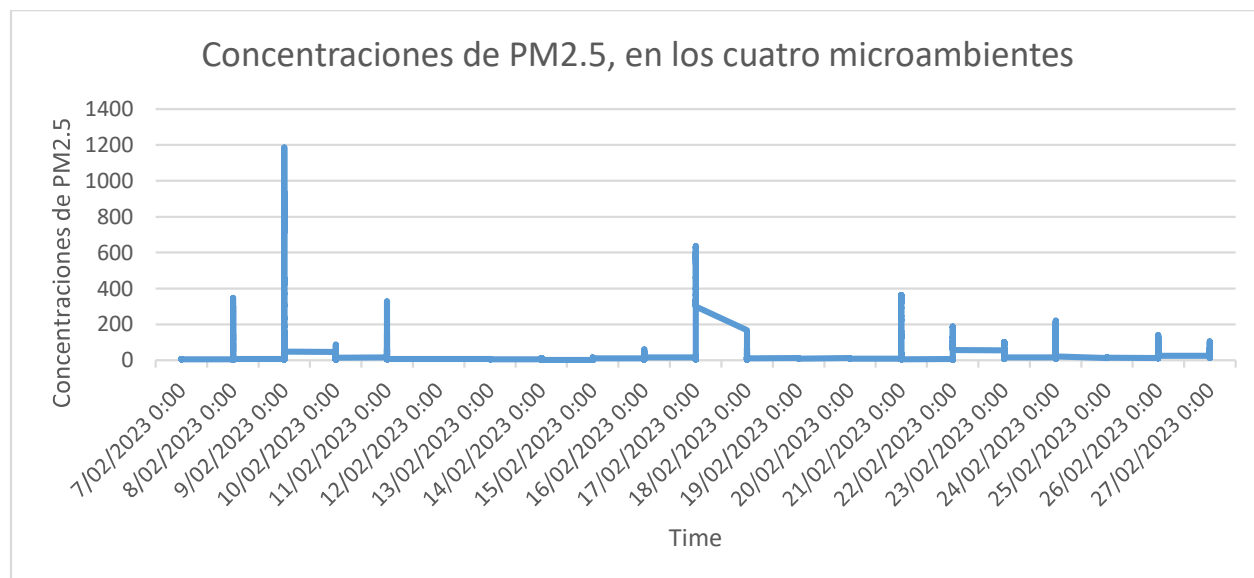
Se identificaron concentraciones excepcionalmente altas de PM_{2.5} en varios microambientes durante el período analizado. En particular, en la cocina, el 24 de febrero de 2023, se registraron concentraciones de 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguidas por un pico de 220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ apenas cuatro minutos después. Estos valores indican la presencia de fuentes de contaminación significativas en la cocina, y se recomienda una evaluación exhaustiva para identificar y abordar dichas fuentes. Además, el microambiente de la Habitación-2 también experimentó picos notables, alcanzando concentraciones de hasta 637 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo anterior se refleja en la figura 9.

En contraste, la Sala-Comedor presentó concentraciones elevadas el 9 de febrero de 2023, con valores que alcanzaron hasta 1186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos niveles extremadamente altos son motivo de gran preocupación y requieren una investigación inmediata para identificar las fuentes de contaminación y aplicar medidas correctivas efectivas.

El análisis integral de todos los microambientes durante el período consideró revelar una concentración media de PM_{2.5} de 25.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una mediana de 20.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La desviación estándar, que indica la dispersión de los datos, se sitúa en 17,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El rango de concentraciones varía desde un mínimo de 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta un máximo de 220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que evidencia la diversidad en la calidad del aire en los diferentes espacios analizados.

Figura 7

Concentración de PM2.5, en los cuatro Microambientes.



Fuente. Elaboración propia.

Estos resultados sugieren una variabilidad significativa en las concentraciones de PM2.5, subrayando la importancia de una gestión activa de la calidad del aire en cada microambiente. Se observa que algunos lugares, como la cocina y la Sala-Comedor, experimentaron concentraciones notoriamente elevadas en momentos específicos, lo que destaca la necesidad de identificar y abordar las fuentes de contaminación en dichas áreas. Este análisis global proporciona una visión comprensiva que servirá de base para implementar estrategias efectivas de mejora de la calidad del aire en el conjunto de los microambientes evaluados.

Tasas de Inhalación Teóricas Promedio para Determinar la Dosis Potencial de Inhalación de una Persona en Microambientes de una Vivienda en Bogotá

Las concentraciones de PM2.5 en diferentes microambientes de una vivienda en Bogotá, se consideraron varios niveles de actividad, desde el reposo hasta el ejercicio vigoroso,

utilizando tasas de inhalación promedio establecidas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para el grupo de edad de 61 a 71 años. La metodología empleada incluyó el registro de las concentraciones de PM2.5 a intervalos regulares y el cálculo de la dosis de inhalación a través de una fórmula que incorpora las tasas de inhalación y el tiempo de exposición.

El procedimiento para obtener los resultados involucró la recopilación de datos de PM2.5 durante el período del 7 al 27 de febrero en cuatro microambientes: sala-comedor, habitación 1, habitación 2 y cocina. Los datos se analizaron estadísticamente para obtener medidas descriptivas como media, mediana, desviación estándar, valores mínimos y máximos. Posteriormente, se calculó la dosis de inhalación para cada nivel de actividad física utilizando las tasas de inhalación específicas y se presentaron los resultados de manera consolidada para proporcionar una visión detallada de la exposición y los riesgos potenciales asociados a la inhalación de PM2.5 en un entorno doméstico.

La metodología para calcular las dosis de inhalación de PM2.5 en diferentes microambientes de una vivienda en Bogotá se fundamenta en la fórmula matemática:

$$D_m^{PM2.5} = \Delta t * \sum C_m^{PM2.5} * TI_m$$

Las tasas de inhalación promedio utilizadas en este estudio se basaron en el "Exposure Factors Handbook" de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), específicamente para el grupo de edad de 61 a 71 años. Las tasas consideradas incluyen cinco niveles de actividad: reposo (5.2×10^{-3} m³/min), sedentario (4.9×10^{-3} m³/min), actividad ligera (1.2×10^{-2} m³/min), actividad moderada (2.6×10^{-2} m³/min) y actividad vigorosa (4.7

$\times 10^{-2}$ m³/min). Estas tasas permiten estimar la dosis inhalada en función de la intensidad de la actividad física del individuo en el entorno doméstico.

Para aplicar esta metodología, se recopilamos datos de concentraciones de PM_{2.5} a intervalos regulares en cuatro microambientes de la vivienda (sala-comedor, habitación 1, habitación 2 y cocina) durante el período del 7 al 27 de febrero. Posteriormente, se realizaron cálculos para cada nivel de actividad física utilizando las tasas de inhalación correspondientes y la fórmula mencionada. Este proceso permitió determinar la dosis potencial de inhalación de PM_{2.5} para cada microambiente y nivel de actividad, proporcionando una visión detallada de la exposición y los riesgos asociados en el entorno doméstico.

Resultados

Los resultados se resumen en la siguiente tabla que muestra las estadísticas descriptivas para las concentraciones de PM_{2.5} y las dosis de inhalación en reposo, sedentario, suave, moderado y vigoroso:

Tabla 8

Estadísticas Descriptivas de las Concentraciones de PM2.5 y dosis potenciales de inhalación en diferentes niveles de actividad física en microambientes domésticos.

	Concentraciones de PM2.5	Tasa de inhalación en reposo (min/día)	Tasa de inhalación en sedentario (m3/min)	Tasa de inhalación en suave (m3/min)	Tasa de inhalación en moderado (m3/min)	Tasa de inhalación en vigoroso (m3/min)	Dosis en reposo (µg/día)	Dosis en sedentario (µg/día)	Dosis en suave (µg/día)	Dosis en moderado (µg/día)	Dosis en vigoroso (µg/día)
Media	25.0	1440.0	0.0052	0.0120	0.0260	0.0470	187.1	431.8	935.6	1691.3	40952659.3
Mediana	11.0	1440.0	0.0052	0.0120	0.0260	0.0470	82.4	190.1	411.8	744.5	1304709.1
Desviación Estándar	56.34	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	421.85	973.50	2109.25	3812.87	304073115.69
Mínimo	1	1440	0.0052	0.012	0.026	0.047	7.488	17.28	37.44	67.68	10782.72
Máximo	1186	1440	0.0052	0.012	0.026	0.047	8880.768	20494.08	44403.84	80268.48	15166930821

Fuente. Elaboración propia.

Concentraciones de PM2.5

Las concentraciones de PM2.5 registradas en los microambientes de la vivienda presentaron una variabilidad notable a lo largo del período de estudio. La concentración promedio fue de 25.0 µg/m³, lo que proporciona una referencia general sobre los niveles de material particulado en el aire interior. Sin embargo, la diferencia significativa entre la concentración mínima de 1 µg/m³ y la máxima de 1186 µg/m³ refleja la presencia de eventos específicos o condiciones que aumentaron drásticamente los niveles de PM2.5 en determinados momentos y lugares dentro de la vivienda.

La alta desviación estándar de $56.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ subraya la heterogeneidad en las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ entre los distintos microambientes y momentos del día. Esta variabilidad puede estar influenciada por diversas actividades cotidianas, como la cocción de alimentos, el uso de calefacción o ventilación, así como factores externos que afecten la calidad del aire interior. La variabilidad significativa en las concentraciones sugiere que no se puede asumir una exposición uniforme al $\text{PM}_{2.5}$ dentro de la vivienda, lo cual es crucial para evaluar adecuadamente los riesgos para la salud.

Asimismo, los valores extremos observados, particularmente el valor máximo de $1186 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indican que ciertos eventos o fuentes puntuales de emisión pueden elevar las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ a niveles peligrosos para la salud. Estos picos pueden estar asociados con actividades específicas o incidentes ocasionales que necesitan ser identificados y gestionados para mitigar los riesgos de exposición. Por lo tanto, es fundamental implementar estrategias de monitoreo y control en el hogar para reducir las fuentes de $\text{PM}_{2.5}$ y proteger la salud de los residentes, especialmente en contextos donde la ventilación puede ser limitada y las fuentes de contaminación interior variadas.

Dosis de Inhalación

La evaluación de la dosis de inhalación de $\text{PM}_{2.5}$ en diferentes niveles de actividad revela importantes implicaciones para la salud de los individuos expuestos en un entorno doméstico. En reposo, la dosis promedio de $187.1 \mu\text{g}/\text{día}$, con un valor máximo de $8880.768 \mu\text{g}/\text{día}$, indica que incluso sin actividad física significativa, la inhalación de partículas finas puede alcanzar niveles preocupantes. Según estudios como el de Pope et al. (2009), la exposición prolongada a niveles moderados de $\text{PM}_{2.5}$ en reposo puede aumentar el riesgo de enfermedades

cardiovasculares y respiratorias, subrayando la necesidad de mantener bajos los niveles de contaminación en los espacios interiores.

Durante actividades sedentarias, la dosis promedio aumenta a 431.8 $\mu\text{g}/\text{día}$, con un valor máximo de 20494.08 $\mu\text{g}/\text{día}$. Este incremento refleja cómo incluso niveles bajos de actividad pueden exacerbar la inhalación de contaminantes. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha documentado que el aumento en la tasa de respiración durante actividades sedentarias eleva la exposición a contaminantes, lo cual puede ser particularmente perjudicial para personas con condiciones preexistentes como el asma (EPA, 2011).

Para actividades de intensidad suave, la dosis promedio se incrementa significativamente a 935.6 $\mu\text{g}/\text{día}$, alcanzando un máximo de 44403.84 $\mu\text{g}/\text{día}$. Este dato resalta la relación directa entre el nivel de actividad física y la cantidad de PM_{2.5} inhalada. Dockery et al. (1993) encontraron que la actividad física en ambientes contaminados puede exacerbar los efectos adversos del PM_{2.5}, aumentando el riesgo de eventos cardíacos agudos y problemas respiratorios. Por lo tanto, es crucial implementar medidas de control y reducción de partículas en hogares donde se practiquen actividades físicas suaves.

La situación se agrava considerablemente en el contexto de actividades moderadas, con una dosis promedio de 1691.3 $\mu\text{g}/\text{día}$ y un valor máximo alarmante de 80268.48 $\mu\text{g}/\text{día}$. Estos valores extremos subrayan los peligros potenciales para la salud durante actividades físicas moderadas en ambientes con altos niveles de PM_{2.5}. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha destacado que la exposición a niveles elevados de PM_{2.5} puede provocar inflamación pulmonar y reducir la función pulmonar, incrementando así el riesgo de enfermedades crónicas (WHO, 2006).

La inhalación durante actividades vigorosas presenta un panorama aún más crítico, con una dosis promedio desmesurada de $40952659.3 \mu\text{g}/\text{día}$ y un máximo que alcanza $15166930821.0 \mu\text{g}/\text{día}$. Estos valores sugieren la necesidad de revisar los cálculos o la viabilidad de tales niveles de actividad en contextos de alta contaminación. El Dr. Arden Pope y sus colaboradores han evidenciado que los esfuerzos vigorosos en ambientes contaminados pueden ser extremadamente peligrosos, llevando a un incremento significativo en la morbilidad y mortalidad (Pope et al., 2002).

La variabilidad extrema en las dosis inhaladas según el nivel de actividad pone de manifiesto la importancia de considerar tanto la calidad del aire interior como el tipo de actividad física realizada dentro del hogar. Como señala la American Lung Association (ALA), es vital reducir la exposición al $\text{PM}_{2.5}$, especialmente durante actividades que aumenten la respiración, para proteger la salud de todos los residentes, especialmente de los más vulnerables como niños y ancianos (ALA, 2020).

Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de estrategias efectivas de control de la contaminación del aire interior y la educación de los residentes sobre los riesgos asociados a diferentes niveles de actividad física en presencia de $\text{PM}_{2.5}$. Implementar sistemas de purificación del aire, mejorar la ventilación y reducir las fuentes de contaminación dentro del hogar son pasos cruciales para mitigar estos riesgos y promover un entorno saludable.

Concluyendo así que, Las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ variaron significativamente a lo largo del período estudiado, evidenciando una alta variabilidad con una concentración promedio de $25.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y picos que alcanzaron hasta $1186 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores sugieren la ocurrencia de eventos específicos de contaminación que elevaron las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en ciertos

momentos y microambientes de la vivienda, lo que resalta la necesidad de un monitoreo continuo y detallado para identificar y mitigar las fuentes de contaminación.

Las dosis potenciales de inhalación de PM_{2.5} indican un riesgo considerable para la salud, especialmente durante actividades moderadas y vigorosas. La dosis promedio de 1691.3 µg/día en actividades moderadas y la alarmante cifra de 40952659.3 µg/día en actividades vigorosas subrayan la gravedad de la exposición a altas concentraciones de PM_{2.5}. Estos resultados tienen implicaciones significativas para la salud de poblaciones vulnerables, como adultos mayores y personas con condiciones respiratorias preexistentes, y enfatizan la importancia de implementar medidas efectivas de control y reducción de la contaminación en ambientes residenciales.

Recomendaciones Domésticas para la Reducción de la Exposición a Material Particulado Intramural

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se sugiere implementar varias estrategias para reducir la exposición a PM_{2.5} en los microambientes domésticos. Primero, se destaca la utilidad de sensores de bajo costo para la medición continua de material particulado. Equipos como el Airthings View Plus y el AirLink de Davis Instruments ofrecen opciones accesibles y eficientes para monitorear las concentraciones de PM_{2.5} en tiempo real. Estos dispositivos permiten a los usuarios tomar decisiones informadas sobre la calidad del aire en sus hogares y actuar cuando se detectan niveles elevados de contaminantes.

El uso de plantas como medio biológico para la purificación del aire es otra recomendación viable. Especies como *Ocimum sanctum*, *Aloe vera* y *Sansevieria trifasciata* han demostrado ser efectivas en la reducción de contaminantes volátiles y mejorar la calidad del aire interior. La incorporación de estas plantas puede complementar otras estrategias de reducción de

PM2.5, aunque se debe considerar la variabilidad en su efectividad según el tipo de contaminante y las condiciones ambientales.

Asimismo, se recomienda adoptar tecnologías y dispositivos para la mejora de la calidad del aire, como los filtros HEPA y los purificadores de aire. Estos dispositivos, al utilizarse correctamente, pueden reducir significativamente la exposición a material particulado. Ensayos clínicos han demostrado que el uso de filtros HEPA puede disminuir la exposición a PM2.5 en un 40%, lo cual es crucial para la protección de la salud en ambientes interiores.

En primer lugar, las concentraciones de exposición personal asociadas a material particulado deben monitorearse para determinar la mala o buena calidad del aire en un microambiente. Por ello, se recomienda la búsqueda y adquisición de un equipo de monitoreo de bajo costo y accesibilidad.

- A. AIRthings View Plus: De las opciones presentadas, esta es la que tiene mayor diversidad de detección de componentes del aire. Está compuesto de 6 sensores distintos. Permite medir temperatura, humedad y presión atmosférica, al igual que concentraciones de radón, material particulado (300nm a 10 μ m), y CO₂. Así mismo, tiene la capacidad de detectar compuestos orgánicos volátiles que están asociados a una gran cantidad de actividades humanas (combustibles fósiles que se evaporan, solventes, pinturas, tintas, componentes de aerosol, combustión de biomasa como leña o incendios forestales, etc.) (Airthings, 2021). Este se puede ver en la figura 3 y tiende a costar USD \$ 299.

Figura 8

Monitor de calidad del aire View Plus del fabricante Airthings.



Nota. Muestra del monitor de calidad de aire. Tomado de *Filtros HEPA, ¿qué son y cómo funcionan?*, Airtécnicos, 2021. <https://www.airtecnicos.com/es/noticias/filtros-hepa-que-son-y-como-funcionan>.

B. AirLink de Davis Instruments: Este es uno de los sensores más accesibles en cuanto a costos y facilidad de instalación. Tiene sensores de humedad, temperatura y material particulado ($0.3 \mu\text{m}$, a $10 \mu\text{m}$). Puede usarse en ambientes intramurales o extramurales. El Airlink dispone de una aplicación móvil, WeatherLink, que muestra en tiempo real el nivel de PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} detectado por los sensores, comparando los resultados mostrados por todos los sensores (Davis Instruments, 2021). Este puede verse en la figura 4 y tiene un costo de USD \$ 179 para el momento de la escritura de este informe. Con un costo de USD \$179 en el momento actual, su relación calidad-precio lo posiciona como una opción atractiva. La gratuidad de la aplicación móvil añade un valor adicional, mejorando la experiencia del usuario.

Figura 9

Monitor de calidad del aire AirLink de Davis Instruments.

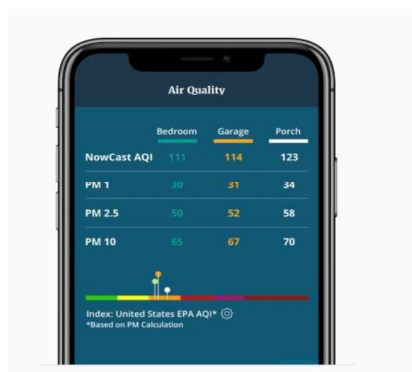


Nota. Figura representativa del monitor de calidad del aire *AirLink*. Tomado de *Monitor de calidad del aire AirLink de Davis Instruments*, Proain, 2024.

<https://proain.com/products/monitor-de-calidad-del-aire-airlink-de-davis-instruments-7210>.

Figura 10

Uso de la aplicación móvil WeatherLink para su uso con el AirLink de Davis Instruments.



Nota. Muestra de la aplicación móvil de Davis Instruments. Tomado de *WeatherLink*, Davis Instruments, 2024.

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.davisinstruments.weatherlink&hl=es&gl=US>

En segundo lugar, se sugiere adoptar mecanismos para la mejora de la calidad del aire. Esta sugerencia se puede implementar de dos maneras, primero, a través de métodos biológicos tales como el uso de organismos que transformen el aire, como las plantas, lo que se denomina *fitoremediación* del aire. Un estudio reciente sugiere que existen especies de plantas domésticas que pueden contribuir a la purificación del ambiente intramural. Esta estrategia utilizó plantas de las especies *Ocinum Sanctum* (Tulasi), *Spathiphyllum* (Lirio de paz), *Epipremnum Aureum* (Hiedra del diablo), *Aloe Vera* (Sábila), *Sansevieria trifasciata* (Planta serpiente, conocida en Colombia como “lengua de suegra”), *Dypsis lutezens* (Palma de areca), *Hedera Helix* (Hiedra inglesa o común), *Rhapsis* (Palma excelsa o rhapsis excelsa), *Ficus elastic* (árbol de caucho) y *Orchidaceae* (orquídeas) en ambientes interiores que fueron medidos con los sensores TGS 4161 para niveles de dióxido de carbono, KE – 25 para oxígeno y DHT11 para temperatura y humedad (Kulkarni & Zambare, 2018).

La investigación mostró que, en un lapso de 400 minutos de presencia en la habitación con buenas condiciones de luz y tierra fértil, los niveles de O₂ son mejores con la *Ocinum Sanctum* (de un 18.56% a un 22.3% de concentración en el aire), mientras que la absorción de CO₂ es mayor para el aloe vera, hiedra inglesa, palma de areca y *ocinum sanctum* (de 429 ppm a 410 y 419 ppm de concentración de CO₂). No obstante, este estudio no arrojó datos sobre la efectividad de las plantas para absorber material particulado. Sin embargo, la capacidad depende de la especie de la planta, propiedades, contenido de humedad del aire (Bandeali et al., 2021). Así mismo, es preciso mencionar que aquellos compuestos sólidos con mayor índice de hidrofobia son menos susceptibles de ser fijados por las plantas de interior al depender de la interacción de éstas con las partículas de agua del ambiente.

Se ha descubierto, sin embargo, que las plantas también son efectivas para la absorción de algunos compuestos volátiles basados en carbono (Hong et al., 2017). Esta efectividad es un área de controversia, puesto que no se ha comprobado la relación biofísica entre disminución de compuestos volátiles orgánicos y la absorción de las plantas, considerando que algunos de estos pueden ser tóxicos para ellas (Cummings & Waring, 2019). Por lo pronto, se sabe que sí pueden fijar y disminuir la presencia en el aire de contaminantes como el formaldehído, el benceno y el tolueno (Han & Ruan, 2020).

Por otro lado, es importante mencionar que se encuentran dispositivos accesibles como los propuestos por la US-EPA (Arciniegas Suárez, 2012), entre los cuales se encuentran:

Los ciclones colectores-separadores, que a través de fuerza centrífuga remueven partículas abrasivas de tamaños grandes. Estos se utilizan en la industria, pero también hay versiones reducidas aptas para el uso doméstico. Permiten separar partículas con tamaños alrededor de 5 μm . También existen multiciclones, que consisten en pequeños ciclones de alta eficacia que se reúnen en un colector común.

Lavadores tipo Venturi: Son mecanismos que inyectan en las entradas de aire chorros finos de agua a alta velocidad, atomizándose y mezclándose con los gases presentes en la zona de expansión del interior. Tienen una eficiencia de recolección de material particulado de entre 70 al 99%.

Precipitadores electrostáticos: Utilizan fuerzas eléctricas para atrapar las partículas fuera de las corrientes de gas y ubicarlas sobre las placas del colector.

Algunas soluciones domésticas también están basadas en una tecnología de filtros denominada HEPA (High Efficiency Particulate Air). Estos filtros son hechos de fibras textiles

especializadas dispuestas al azar que atrapan el material particulado y otros contaminantes, tales como bacterias o virus, material alergénico. Pese a que el espacio entre las fibras es mayor a los 3 μm , las partículas no pasan ya que se adhieren a las hebras de las fibras que rozan (Kadam et al., 2018). Un ensayo clínico realizado recientemente muestra que el uso de estos filtros reduce la exposición a material particulado en interiores en un 40% (Kajbafzadeh et al., 2015), aunque es posible que el avance tecnológico de estos en la actualidad permita eficiencias mayores.

Figura

11

Filtro de fibras en un dispositivo HEPA.



Nota. Se muestra el filtro de fibras en un dispositivo HEPA. Tomado de *Malla de fibras de vidrio de un filtro HEPA aumentada*, Garrido, J., 2018.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malla_de_fibras_de_vidrio_de_un_filtro_HEPA_aumentada.png.

Figura 12

Filtro de aire basado en la tecnología HEPA, fabricado por Xiaomi.



Nota. Se presenta el filtro de aire basado en la tecnología HEPA. Tomado de *Xiaomi Smart Air Purifier 4 Preguntas frecuentes*, Xiaomi Colombia, 2026.

<https://www.mi.com/co/support/faq/details/KA-1064471/>

Los purificadores de aire (calentador/ventilador con filtros HEPA) en Colombia son comercializados por fabricantes que, además, incorporan a sus dispositivos capacidad de conectividad a través de Wi-Fi, de manera que sean interoperables con hogares contengan un ecosistema de Internet de las Cosas, tales como Oster, Kalley o Xiaomi.

En tercer lugar, se proponen acciones preventivas que permitan evitar las fuentes más típicas de material particulado doméstico dentro de interiores, basadas en las sugerencias establecidas por la Agencia Americana de Protección Ambiental (US EPA, 2021):

Los aparatos que hacen combustión deben ventilarse hacia el exterior, tales como estufas, calentadores u hornos. Igualmente, se sugiere utilizar extractores o ventiladores cuando se cocine, que permitan extraer el aire y material particulado y transportarlo al exterior.

La cocina con carbón y leña preferiblemente debe hacerse en el exterior. En casas en las que no hay instalación de gas o no se pueda acceder a cilindros de propano licuado, puede ser

importante utilizar estufas de leña que sean de tamaño adecuado, cerradas o confinadas en vez de abiertas, para poder utilizar una menor cantidad de leña.

Realizar mantenimientos preventivos de las estufas y equipos de cocina. Estufas con ausencia de mantenimiento pueden convertir materiales presentes en el aire en hollín, y producir una combustión incompleta (llama amarilla).

Evitar el consumo de tabaco.

Si se utilizan sistemas de calefacción y refrigeración centrales, se recomienda cambiar periódicamente los filtros.

Utilizar purificadores de aire y realizar mantenimiento de estos de manera periódica.

Se proponen acciones preventivas para evitar las fuentes más típicas de material particulado doméstico. Estas incluyen ventilar adecuadamente los aparatos que hacen combustión, como estufas y calentadores, utilizando extractores durante la cocción y preferentemente cocinar con carbón o leña en el exterior. Además, se recomienda realizar mantenimientos preventivos de los equipos de cocina y calefacción para evitar la combustión incompleta y reducir la producción de hollín. También es importante evitar el consumo de tabaco dentro de la vivienda y cambiar periódicamente los filtros de los sistemas de calefacción y refrigeración centrales.

Implementar estas recomendaciones puede reducir significativamente la exposición a PM2.5 en el hogar, mejorando la calidad del aire interior y protegiendo la salud de los residentes. La combinación de monitoreo continuo, uso de plantas, tecnologías de filtración y acciones preventivas proporciona un enfoque integral para abordar la contaminación del aire interior de manera efectiva.

Conclusiones

En conclusión, el análisis detallado de los microambientes residenciales, abordando la distribución de concentraciones de exposición personal a PM_{2.5} a través de un sensor de bajo costo, ha revelado patrones y eventos notables. La exploración de cuatro microambientes específicos: Sala-Comedor, Habitación-1, Habitación-2 y Cocina, ha permitido identificar concentraciones extremadamente elevadas en momentos específicos, como en la Sala-Comedor el 9 de febrero, donde se registraron niveles preocupantemente altos de hasta 1186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, la Habitación-2 y la Cocina también experimentaron eventos de contaminación significativa, destacando la necesidad de medidas correctivas inmediatas. El análisis global indica una variabilidad significativa en las concentraciones de PM_{2.5}, enfatizando la importancia de una gestión activa de la calidad del aire en cada microambiente específico.

Las concentraciones de PM_{2.5} variaron significativamente a lo largo del período estudiado, evidenciando una alta variabilidad con una concentración promedio de 25.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y picos que alcanzaron hasta 1186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores sugieren la ocurrencia de eventos específicos de contaminación que elevaron las concentraciones de PM_{2.5} en ciertos momentos y microambientes de la vivienda, lo que resalta la necesidad de un monitoreo continuo y detallado para identificar y mitigar las fuentes de contaminación.

Las dosis potenciales de inhalación de PM_{2.5} indican un riesgo considerable para la salud, especialmente durante actividades moderadas y vigorosas. La dosis promedio de 1691.3 $\mu\text{g}/\text{día}$ en actividades moderadas y la alarmante cifra de 40952659.3 $\mu\text{g}/\text{día}$ en actividades vigorosas subrayan la gravedad de la exposición a altas concentraciones de PM_{2.5}. Estos resultados tienen implicaciones significativas para la salud de poblaciones vulnerables, como adultos mayores y personas con condiciones respiratorias preexistentes, y enfatizan la

importancia de implementar medidas efectivas de control y reducción de la contaminación en ambientes residenciales.

El análisis de las tasas de inhalación teóricas promedio para determinar la dosis potencial de inhalación de una persona en microambientes de una vivienda en Bogotá mostró que la exposición a PM_{2.5} varía considerablemente según el nivel de actividad. Utilizando tasas de inhalación promedio establecidas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para el grupo de edad de 61 a 71 años, se identificó que incluso en reposo, la dosis de inhalación puede ser significativa. Este hallazgo resalta la necesidad de estrategias de mitigación efectivas, especialmente en entornos donde las actividades físicas pueden incrementar significativamente la dosis de inhalación de contaminantes.

De acuerdo con la información científica revisada el uso de plantas domésticas de interiores que puedan fijar contaminantes gaseosos y particulados, y el uso de equipos con filtros HEPA pueden reducir las concentraciones de exposición a contaminantes del aire. Igualmente, es importante tratar todas las fuentes de material particulado que se originan al interior de los microambientes domésticos, tales como la cocina con leña no regulada, el estado de los equipos de combustión y disminuir al mínimo el uso de tabaco y vaporizadores.

¿Cuál es la dosis potencial de inhalación de PM_{2,5} en los microambientes de una vivienda en Bogotá?

La dosis potencial de inhalación de PM_{2.5} en los microambientes de una vivienda en Bogotá varía considerablemente según el nivel de actividad física. En reposo, la dosis promedio es de 187.1 µg/día, alcanzando un máximo de 8880.768 µg/día. Esta cifra aumenta significativamente durante actividades sedentarias y ligeras, con dosis promedio de 431.8 µg/día y 935.6 µg/día respectivamente, y valores máximos que llegan a 20494.08 µg/día y 44403.84

$\mu\text{g}/\text{día}$. Estos resultados indican que incluso actividades de baja intensidad pueden resultar en una considerable inhalación de partículas PM2.5.

Durante actividades físicas más intensas, como las moderadas y vigorosas, las dosis de inhalación de PM2.5 se incrementan drásticamente. La dosis promedio para actividades moderadas es de $1691.3 \mu\text{g}/\text{día}$, con un máximo de $80268.48 \mu\text{g}/\text{día}$, mientras que, en actividades vigorosas, la dosis promedio alcanza niveles extremadamente altos, con $40952659.3 \mu\text{g}/\text{día}$ y un valor máximo de $15166930821.0 \mu\text{g}/\text{día}$. Estos valores tan elevados sugieren que las actividades físicas en ambientes con alta concentración de PM2.5 pueden representar un riesgo significativo para la salud, particularmente para poblaciones vulnerables como adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias preexistentes.

Recomendaciones

Para reducir la exposición a PM2.5 en microambientes domésticos, se recomienda la implementación de diversas estrategias basadas en los resultados obtenidos de la investigación. En primer lugar, el uso de sensores de bajo costo como el Airthings View Plus y el AirLink de Davis Instruments es crucial para el monitoreo continuo de las concentraciones de PM2.5. Estos dispositivos ofrecen una forma accesible y eficiente de medir la calidad del aire en tiempo real, permitiendo a los residentes tomar decisiones informadas y actuar rápidamente cuando se detectan niveles elevados de contaminantes.

El uso de plantas como medio biológico para la purificación del aire también es una recomendación viable. Especies como *Ocimum sanctum*, *Aloe vera* y *Sansevieria trifasciata* han demostrado ser efectivas en la reducción de contaminantes volátiles y mejorar la calidad del aire interior. Aunque la efectividad puede variar según el tipo de contaminante y las condiciones ambientales, la incorporación de estas plantas puede complementar otras estrategias de reducción de PM2.5. Además, estudios han indicado que ciertas plantas pueden ayudar a disminuir la concentración de CO2 y mejorar la concentración de oxígeno en el aire interior.

La adopción de tecnologías y dispositivos para la mejora de la calidad del aire es otra recomendación importante. Los filtros HEPA y los purificadores de aire, cuando se utilizan correctamente, pueden reducir significativamente la exposición a material particulado. Ensayos clínicos han demostrado que el uso de filtros HEPA puede disminuir la exposición a PM2.5 en un 40%, lo cual es crucial para la protección de la salud en ambientes interiores. Además, los purificadores de aire modernos con conectividad Wi-Fi y capacidad de integración en hogares inteligentes pueden facilitar un monitoreo y control más eficiente de la calidad del aire.

Es fundamental implementar acciones preventivas que permitan evitar las fuentes más típicas de material particulado dentro de interiores. Esto incluye la ventilación adecuada de aparatos que hacen combustión, como estufas y calentadores, utilizando extractores de aire durante la cocción y evitando el uso de combustibles sólidos dentro de la vivienda. El mantenimiento regular de estos aparatos para asegurar una combustión completa y eficiente es esencial para minimizar la producción de hollín y otros contaminantes.

Asimismo, se recomienda evitar el consumo de tabaco dentro de la vivienda, ya que el humo de tabaco es una fuente significativa de PM_{2.5}. El cambio periódico de los filtros de sistemas de calefacción y refrigeración centrales también es crucial para mantener una buena calidad del aire interior. La adopción de purificadores de aire con filtros HEPA, junto con un mantenimiento regular de estos dispositivos, puede proporcionar una barrera adicional contra la contaminación del aire interior.

La combinación de monitoreo continuo, uso de plantas, tecnologías de filtración y acciones preventivas proporciona un enfoque integral para abordar la contaminación del aire interior de manera efectiva. Implementar estas recomendaciones puede reducir significativamente la exposición a PM_{2.5} en el hogar, mejorando la calidad del aire interior y protegiendo la salud de los residentes, especialmente de aquellos que son más vulnerables, como niños y ancianos. La promoción de estas estrategias y la educación sobre su importancia pueden contribuir a la creación de ambientes domésticos más saludables y sostenibles.

Para garantizar una mejora continua en la calidad del aire en los microambientes domésticos y obtener una comprensión más completa de los impactos de PM_{2.5} en la salud, se recomienda la ampliación del estudio a largo plazo y su implementación en diferentes contextos residenciales y urbanos. Esta extensión permitiría evaluar la efectividad de las estrategias de

mitigación propuestas y adaptarlas según las variaciones estacionales y geográficas. Un enfoque prospectivo incluiría la incorporación de sensores adicionales en una mayor variedad de hogares, abarcando distintas condiciones socioeconómicas y arquitectónicas. Además, sería valioso realizar estudios comparativos en diversas ciudades colombianas con diferentes niveles de contaminación ambiental para generalizar los hallazgos y proponer políticas públicas más efectivas.

Paralelamente, se sugiere explorar la integración de tecnologías emergentes, como la Internet de las Cosas (IoT), para el monitoreo en tiempo real y la automatización de sistemas de purificación de aire. La colaboración con instituciones de salud pública y académicas puede facilitar el desarrollo de modelos predictivos que correlacionen las concentraciones de PM_{2.5} con indicadores de salud, proporcionando una base sólida para campañas de concienciación y políticas regulatorias enfocadas en la reducción de la contaminación del aire interior.

En conclusión, la continuidad y ampliación de esta investigación no solo contribuirán a un conocimiento más profundo y exhaustivo del comportamiento del PM_{2.5} en microambientes, sino que también promoverán la implementación de soluciones innovadoras y efectivas para mejorar la calidad del aire y proteger la salud pública a largo plazo.

Referencias Bibliográficas

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (23 de abril de 2024). Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente.
<https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Airtécnicos. (17 de febrero de 2021). Filtros HEPA, ¿qué son y cómo funcionan?
<https://www.airtecnicos.com/es/noticias/filtros-hepa-que-son-y-como-funcionan>
- Alfonso, D. (2018). Emisiones de material particulado de los vehículos en Bogotá. Estrategías de gestión ambiental para su mitigación. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/38114/DOCUMENTO%20DIANA%20MELISA%20ALFONSO.pdf>
- American Lung Association. (2020). State of the Air. American Lung Association.
<https://www.lung.org/research/sota>
- Bergadà, J. (2006). Mecánica de fluidos. Problemas resueltos. Oficina de Publicaciones Acadèmiques Digitals de la UPC:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36662/9788476539156.pdf>
- CONPES 3943. (31 de junio de 2018). Consejo Nacional de Política Económica y Social.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3943.pdf>
- Contreras, Z., & Gutiérrez, J. (2022). Microorganismos asociados a signos y síntomas en trabajadores de laboratorios en docencia e investigación. *Rev Asoc Esp Med Trab*, 31, 321-459.

Daily, J., & Harleman, D. (2018). Dinámica De Los Fluidos Con Aplicaciones En Ingeniería.

<https://dokumen.pub/dinamica-de-los-fluidos-con-aplicaciones-en-ingenieria.html>

DANE. (15 de mayo de 2024). Producto Interno Bruto (PIB) nacional trimestral.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/pib-informacion-tecnica>

Davis Instruments. (18 de enero de 2024). WeatherLink.

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.davisinstruments.weatherlink&hl=es&gl=US>

Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., ... & Speizer, F. E.

(1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New*

England Journal of Medicine, 329(24), 1753-1759.

<https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>

Environmental Protection Agency. (2011). Exposure Factors Handbook (2011 Edition). U.S.

Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/052F.

<https://www.epa.gov/expobox/exposure-factors-handbook-chapter-6>

EPA. (25 de junio de 2024). Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas

en inglés). <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25>

EPA. (abril de 2024). El humo de la leña y su salud. [https://espanol.epa.gov/espanol/el-humo-](https://espanol.epa.gov/espanol/el-humo-de-la-lena-y-su-salud)

[de-la-lena-y-su-salud](https://espanol.epa.gov/espanol/el-humo-de-la-lena-y-su-salud)

Garrido, J. (09 de junio de 2018). Malla de fibras de vidrio de un filtro HEPA aumetanda.png.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malla_de_fibras_de_vidrio_de_un_filtro_HEP
A_aumetanda.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malla_de_fibras_de_vidrio_de_un_filtro_HEP_A_aumetanda.png)

Gobierno CDMX. (noviembre de 2023). Informe de análisis prospectivo 2024-2050.

https://www.iecm.mx/www/sites/elecciones2024/assets/files/plataformas/1_1_Plataforma_VaXLaCDMX.pdf

Greentology. (27 de febrero de 2023). ¿Qué es PM2.5 y por qué se relaciona con la contaminación? <https://greentology.life/2023/02/27/que-es-pm2-5-y-por-que-se-relaciona-con-la-contaminacion/>

Grupo Banco Mundial. (01 de septiembre de 2022). Lo que hay que saber sobre el cambio climático y la contaminación atmosférica.

<https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/09/01/what-you-need-to-know-about-climate-change-and-air-pollution>

Hernández, J. (23 de agosto de 2021). Minsalud comprometido con la calidad del aire. Boletín de Prensa: <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-comprometido-con-la-calidad-del-aire-.aspx>

Kelly, N. (04 de febrero de 2023). Por qué Japón tiene ahora su mayor cantidad de muertes por covid tras 2 años con la pandemia bajo control. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-64515715>

Londoño, G. (2019). Aunar esfuerzos técnicos y financieros para evaluar los componentes claves de aerosoles atmosféricos en la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá FASE II, a partir de la generación de conocimiento obtenido en un estudio de caracterización química. Medellín: Convenio interadministrativo 734 de 2019.

https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/CaracterizacionMaterialParticulado_FaseII.pdf

Méndez, F. (2011). El papel de la epidemiología ambiental en el desarrollo disciplinar de la epidemiología. *Colombia Médica*, 42(3), 278-285.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-95342011000300003

Min Agricultura. (13 de febrero de 2023). La mala calidad del aire no solo afecta a los pulmones, sino también a la salud mental. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/La-mala-calidad-del-aire-no-solo-afecta-a-los-pulmones,-sino-tambi%C3%A9n-a-la-salud-mental.aspx>

Ministerio de Ambiente. (2021). La contaminación atmosférica en Colombia. Bogotá DC:

<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/>

OMS. (15 de diciembre de 2023). Contaminación del aire doméstico.

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>

OMS. (19 de diciembre de 2022). Contaminación del aire ambiente (exterior).

[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

OMS. (6 de mayo de 2024). Asma. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/asthma>

Organización Mundial de la Salud. (19 de diciembre de 2022). Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (2023). Calidad del aire.

<https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>

Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D.

(2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9), 1132-1141.

<https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>

Pope, C. A., Ezzati, M., & Dockery, D. W. (2009). Fine-particulate air pollution and life

expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, 360(4), 376-386.

<https://doi.org/10.1056/NEJMsa0805646>

Proain. (2024). Monitor de calidad del aire AirLink de Davis Instruments. SKU: 7210DAVIS:

<https://proain.com/products/monitor-de-calidad-del-aire-airlink-de-davis-instruments-7210>

Ramírez, L. (18 de abril de 2021). ¿Conoces qué es el material particulado o polvo que circula en

Bogotá? <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/que-es-el-material-particulado-o-polvo-en-el-aire>

Saavedra, S. (22 de enero de 2020). Contaminación del aire y enfermedades cardiovasculares.

<https://www.siacardio.com/editoriales/prevencion-cardiovascular/contaminacion-del-aire-y-enfermedades-cardiovasculares/>

Valladolid. (2024). Material particulado PM10/PM2,5. Red de Control de la Contaminación

Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid:

<https://www.valladolid.es/es/rccava/contaminantes/material-particulado-pm10-pm2-5>

World Health Organization. (2006). Air quality guidelines: Global update 2005. World Health

Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02>

Xiaomi Colombia. (2026). Xiaomi Smart Air Purifier 4 Preguntas frecuentes. Xiaomi Colombia.

<https://www.mi.com/co/support/faq/details/KA-1064471/>