

PANORAMA DEL PM_{2.5} EN MÉXICO Y SU IMPACTO EN LA SALUD

Mayra Luisa Contreras Ramírez ^{a,*}, Mónica Terán Hernández ^b, César Enrique Rivas Santiago ^a, Bruno Rivas Santiago ^c, Irma Elizabeth González Curiel ^{a,*}.

^a Laboratorio de Inmunotoxicología. Maestría en Ciencia y Tecnología Química. Unidad Académica de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Zacatecas. mayra.contreras@uaz.edu.mx, irmacuriel@uaz.edu.mx.

^b Facultad de Enfermería y Nutrición (FEN). Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Research Affiliate, Center on Democracy, Development and the Rule of Law (CDDRL) at Stanford University.

^c Unidad de Investigación Biomédica de Zacatecas, Instituto Mexicano del Seguro Social.

Resumen

A través del presente artículo se presenta el problema de las partículas finas en suspensión, conocidas como PM_{2.5}, y su influencia en la calidad del aire y la salud pública en México. Se describen las características de estas partículas, las cuales son lo suficientemente pequeñas para penetrar en el sistema respiratorio y causar diversos efectos dañinos. De la misma manera, se aborda la importancia que presenta el monitoreo de la calidad del aire en el país a través de plataformas digitales, tal es el caso del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, que permite un seguimiento preciso de los niveles de contaminantes criterio mediante su base de datos. Además, se presenta la relación existente con las Normas Oficiales Mexicanas que establecen los límites máximos permisibles de PM_{2.5}, y cómo estos se reflejan en el Índice Aire y Salud, utilizado para alertar a la población sobre los riesgos asociados. Finalmente, se exploran los efectos de la exposición corta y prolongada al PM_{2.5} en la salud, incluyendo problemas respiratorios, cardiovasculares y su relación con enfermedades crónicas.

Palabras clave: Contaminación atmosférica; Material particulado; Monitoreo ambiental; Salud pública.

PERSPECTIVE OF PM_{2.5} IN MEXICO AND ITS HEALTH EFFECT

Abstract

This article presents the issue of fine suspended particles, known as PM_{2.5}, and their influence on air quality and public health in Mexico. The characteristics of these particles are described as small enough to penetrate the respiratory system and cause various harmful effects. Likewise, the importance of air quality monitoring in the country through digital platforms is discussed, such as the Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), which allows for precise tracking of criteria pollutant levels through its database. Furthermore, the relationship with Mexican Official Standards, which set the maximum allowable limits for PM_{2.5}, is presented, along with how these limits are reflected in the Air and Health Index, used to alert the public to associated risks. Finally, the effects of short- and long-term exposure to PM_{2.5} on health are explored, including respiratory and cardiovascular problems, and their link to chronic diseases.

Keywords: Air pollution; Environmental monitoring; Particulate matter; Public health.

1. Introducción

La contaminación atmosférica se ha convertido en una problemática global de proporciones alarmantes. A medida que las ciudades crecen y las industrias proliferan, el aire se contamina con una mezcla tóxica de partículas, gases y sustancias químicas nocivas (Saxena y Sonwani 2019). La industrialización, con su creciente demanda de energía y recursos, ha sido uno de los principales motores de esta crisis, contribuyendo significativamente a la emisión de contaminantes atmosféricos. Las emisiones de fábricas, la quema de combustibles fósiles y el tráfico vehicular son solo algunas de las fuentes que liberan al aire sustancias dañinas que afectan la calidad del aire ambiente (Mukherjee, y Agrawal, 2017).

Los efectos de la contaminación del aire son devastadores y de un alcance global. La exposición a contaminantes del aire se encuentra asociada a enfermedades respiratorias, problemas cardiovasculares y un aumento en la mortalidad prematura, afectando de manera desproporcionada a poblaciones vulnerables (Thangavel y col., 2022). Este riesgo no se limita únicamente a los espacios exteriores; muchos contaminantes del aire exterior, como el material particulado (PM) y el ozono

troposférico, se infiltran en hogares y lugares de trabajo, creando ambientes interiores que pueden ser igualmente perjudiciales, e incluso más, debido al tiempo prolongado que se reside en ellos. Además, existen numerosas fuentes internas de contaminación, como emisiones de productos de limpieza, materiales de construcción, y la cocción de alimentos, que incrementan la concentración de contaminantes en espacios cerrados. Estos factores, junto con una ventilación deficiente, aumentan significativamente los riesgos para la salud pública (Goldstein y col., 2020).

Entre los diversos contaminantes que afectan la salud y el medio ambiente, los contaminantes criterio son especialmente preocupantes. En particular, el PM fino, representan un desafío que requiere atención prioritaria (Saxena y Sonwani 2019).

El objetivo del presente artículo radica en analizar la problemática actual de la mala calidad del aire y los riesgos para la salud que pueden derivarse por esta problemática, con énfasis en los efectos adversos del PM_{2.5}, resaltando la importancia de adoptar las medidas actuales que contribuyen a mejorar la calidad del aire y el bienestar de la población.

2. Contaminantes Criterio: el impacto invisible en el aire que respiramos

La contaminación atmosférica se ha convertido en uno de los mayores desafíos globales en la actualidad, posicionándose como la segunda mayor causa de riesgo de mortalidad a nivel mundial en 2021 (Health Effects Institute, 2024).

A pesar de los numerosos esfuerzos tecnológicos y las políticas implementadas para mitigar esta crisis medio ambiental, los niveles de contaminación en el aire siguen superando los límites control. En este contexto, los contaminantes criterio (compuestos cuya concentración está regulada para proteger la salud humana y el ambiente) desempeñan un papel fundamental (OMS, 2021). Estos contaminantes, que incluyen algunos gases de efecto invernadero, y partículas en suspensión, no solo influyen intrínsecamente al efecto del cambio climático, sino que también pueden contribuir a la susceptibilidad hacia diversas enfermedades (Saxena y Sonwani, 2019).

Estos contaminantes han sido identificados y regulados constantemente por organismos internacionales, tal es el caso de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud (EPA,

2024; OMS, 2021). En este sentido, México, ha presentado acciones decisivas al actualizar sus Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para redefinir los límites máximos permisibles (LPM) para estos contaminantes; estas nuevas regulaciones no solo refuerzan el compromiso del país con la protección de la salud pública, sino que también lo posicionan a cada vez estar más cerca de los límites internacionales, con esto, se busca proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población (Gobierno de México, 2017). En la Tabla 1, se presenta una breve descripción.

Dentro del grupo de contaminantes criterio, el PM_{2.5} se destaca por su grave repercusión en la salud pública. Estas partículas comprenden una fracción que puede ser inhalada profundamente, alcanzando los pulmones e incluso el sistema circulatorio (Mukherjee y Agrawal, 2017). Su capacidad para ingresar en el organismo y provocar daños a largo plazo, las convierte en uno de los contaminantes más peligrosos, y su control es clave para mejorar la salud de las poblaciones expuestas (Saxena y Sonwani, 2019). Por esta razón, son motivo de especial atención en las discusiones sobre la calidad del aire y su relación con el riesgo que presenta hacia la salud.

Tabla 1. Contaminantes Criterio y normatividad aplicable como medida de protección a la salud.

Contaminante	Descripción	Normatividad aplicable / Límite Control ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
Ozono troposférico (O_3)	Gas que se forma a nivel del suelo por la reacción de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV) bajo la luz solar.	NOM-020-SSA1-2021 [1 h] 176	[8 h] 118
Monóxido de carbono (CO)	Gas inodoro e incoloro que se produce por la combustión incompleta de combustibles fósiles.	NOM-021-SSA1-2021 [1 h] 30,000	[8 h] 10,000
Dióxido de azufre (SO_2)	Gas irritante que se libera principalmente en procesos industriales que queman carbón o petróleo.	NOM-022-SSA1-2019 [1 h] 196.5	[24 h] 104.8
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	Gas tóxico que se genera principalmente por la quema de combustibles fósiles, como en vehículos y plantas de energía.	NOM-023-SSA1-2021 [1 h] 200	[Anual] 40
Material particulado (PM)	PM por sus siglas en inglés <i>particulate matter</i> . Incluye partículas gruesas (PM_{10}) y finas ($\text{PM}_{2.5}$) que permanecen suspendidas en el aire.	NOM-025-SSA1-2021 PM_{10} [24 h] 60 [Anual] 28	$\text{PM}_{2.5}$ [24 h] 33 [Anual] 10
Plomo (Pb)	Metal tóxico emitido por actividades industriales, como la minería y la fundición. Se bioacumula en el suelo y el agua.	NOM-026-SSA1-2021 [Anual] 0.50	

Fuente: Saxena y Sonwani, (2019),

3. Material particulado: Un riesgo invisible

3.1. Particularidades del $\text{PM}_{2.5}$

El $\text{PM}_{2.5}$ o también conocido como partículas finas, pertenece a una especie de contaminantes extremadamente diminutos (con un diámetro $\leq 2.5 \mu\text{m}$), lo que las hace invisibles a simple vista. Para tener una referencia, un cabello humano presenta un grosor promedio de aproximadamente $70 \mu\text{m}$, lo que significa que el $\text{PM}_{2.5}$ es

aproximadamente 28 veces menor. Debido a esta característica, se les permite penetrar profundamente en los pulmones e incluso alcanzar el sistema circulatorio, aumentando así su potencial para causar efectos adversos en la salud. Este tamaño las diferencia notablemente del PM_{10} , las cuales por lo general suelen quedar atrapadas en las vías respiratorias superiores (Figura 1) (Thangavel y col., 2022; SEMARNAT, 2011).

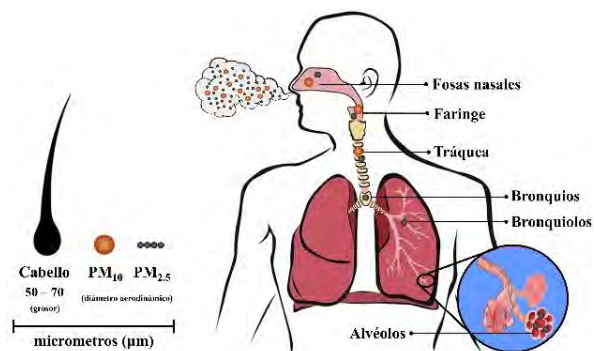


Figura 1. Acumulación de PM en vías respiratorias de acuerdo con su tamaño. Fuente: Adaptado de Thangavel y col. (2022).

Además, del efecto por su tamaño, el $PM_{2.5}$ también es peligroso debido a su compleja composición química. Estas partículas están formadas por una mezcla de sustancias que se dividen en componentes mayoritarios y minoritarios. Entre los componentes mayoritarios se encuentran los sulfatos y nitratos, que se generan a partir de la oxidación del dióxido de azufre y la reacción de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera. Mientras que los componentes minoritarios contienen elementos traza como algunos metales pesados (plomo, mercurio y cadmio) y cenizas de carbón, que, aunque representan una menor proporción de la masa de las $PM_{2.5}$ son responsables en gran parte de su toxicidad (Vargas y col., 2017; SEMARNAT, 2011).

Al conocer los diferentes componentes y sus fuentes, se puede implementar medidas más específicas para proponer tratamientos para

sus efectos nocivos, así como alternativas de equipos para mejorar la calidad del aire.

La formación de $PM_{2.5}$ se origina a través de una combinación de procesos tanto naturales como antropogénicos. Entre las principales fuentes antropogénicas se encuentran las actividades industriales y agrícolas, así como la quema de combustibles fósiles para la generación de energía. Este último proceso libera gases contaminantes que, al reaccionar en la atmósfera, generan partículas finas. Además, puede formarse a partir de la quema de biomasa, como en incendios forestales, así como por la erosión del pavimento y la fricción de los frenos y neumáticos de los automóviles. También se produce a través de la condensación de vapores orgánicos, que se convierten en partículas sólidas o líquidas al enfriarse (Mukherjee y Agrawal, 2017; SEMARNAT, 2011).

Por otro lado, el $PM_{2.5}$ también tiene orígenes naturales. Estos incluyen fenómenos como la actividad volcánica, tormentas de polvo y el rocío marino, que contribuyen a la presencia de estas partículas en la atmósfera (Kim y col., 2015).

Una vez presentes en la atmósfera, el $PM_{2.5}$ puede permanecer suspendido durante períodos prolongados, lo que aumenta la

exposición de la población a estos contaminantes. Dependiendo de su tamaño y las condiciones ambientales, estas partículas, especialmente aquellas de entre 0.1 y 1 μm , pueden permanecer en el aire durante días o incluso semanas, permitiendo que se transporten a grandes distancias y afecten la calidad del aire en regiones alejadas de sus fuentes de emisión (SEMARNAT, 2011).

Este prolongado tiempo de permanencia y su capacidad de dispersarse sobre amplias áreas subrayan la importancia de reducir la emisión de $\text{PM}_{2.5}$.

3.2. Panorama del $\text{PM}_{2.5}$ en México

La calidad del aire en México ha sido motivo de preocupación en los últimos años, especialmente en lo que respecta al $\text{PM}_{2.5}$, debido a que es común de encontrarse en el entorno y representa un peligro para la salud pública (SEMARNAT, 2011).

En México, las estaciones de monitoreo atmosférico se consideran un punto clave al proporcionar datos en tiempo real sobre condiciones meteorológicas y la concentración de contaminantes criterio. Esto permite a las autoridades y a la población tomar decisiones informadas para mitigar la exposición a niveles riesgosos de contaminación (SEMARNAT, 2024).

En este sentido, el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), implementado en 2016 por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), se ha convertido en una plataforma esencial para el monitoreo de la calidad del aire en México. Con más de 65 Sistemas de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA) distribuidas en 24 entidades federativas, el SINAICA desempeña un papel fundamental en la recolección y difusión de datos sobre los niveles de contaminación atmosférica (INECC, 2024).

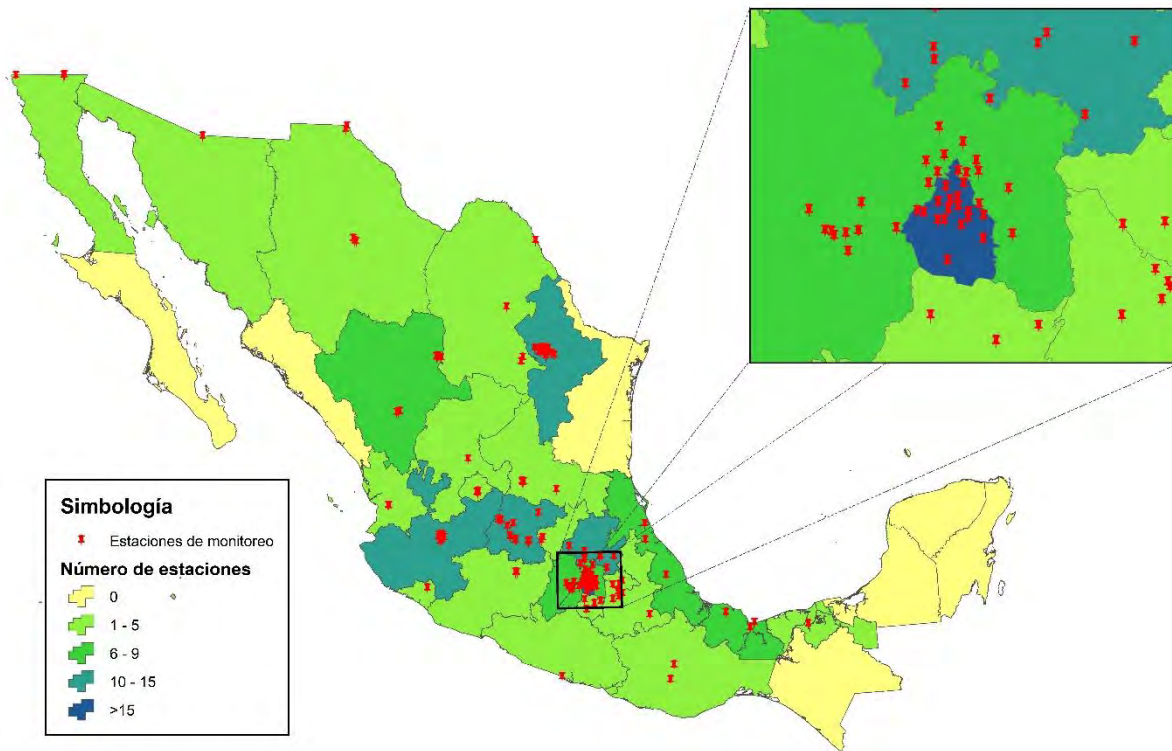


Figura 2. Estaciones de monitoreo distribuidas en la República mexicana. Fuente: Elaboración propia, con datos recopilados de INECC, (2024).

Actualmente, para el año de 2024, el SINAICA cuenta con 151 estaciones activas de monitoreo atmosférico, de las cuales solo 144 están equipadas para la medición de PM_{2.5}. En la Figura 2, se muestra la distribución de estas estaciones, destacado que Estados como Guanajuato y la Zona Metropolitana del Valle de México cuentan con una amplia cobertura de monitoreo; mientras que Estados como Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Sinaloa, Tamaulipas y Yucatán aún no cuentan con ninguna estación de monitoreo.

La importancia de la base de datos proporcionada por el SINAICA radica en su uso para clasificar los niveles de contaminación a través del Índice Aire y Salud, establecido en la NOM-172-SEMARNAT-2023 (DOF, 2024). Este índice, sigue los lineamientos establecidos por Índice de Calidad del Aire (ICA) de Estados Unidos (EPA, 2024), y clasifica la calidad del aire mediante un sistema de colores y calificativos. Esta clasificación proporciona una referencia clara para la población sobre los riesgos para la salud pública, que varían desde condiciones

aceptables hasta niveles que pueden causar graves afectaciones (DOF, 2024; Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2020).

Antes de la implementación de este índice a nivel nacional, el monitoreo de la calidad del aire se comunicaba a través de los Puntos IMECA (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire), el cual presentaba la gran limitante de aplicarse únicamente para la Zona Metropolitana del Valle de México.

Una de las principales diferencias entre estos índices radica en la comunicación de los

niveles de contaminación y los riesgos asociados. El índice aire y salud ajusta las franjas de riesgo, iniciando las categorías de riesgo en bajo, moderado, muy alto y extremadamente alto a concentraciones menores (Figura 3), lo que permite una protección más efectiva de los grupos sensibles, como niños, adultos mayores y personas con comorbilidades (Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2020).

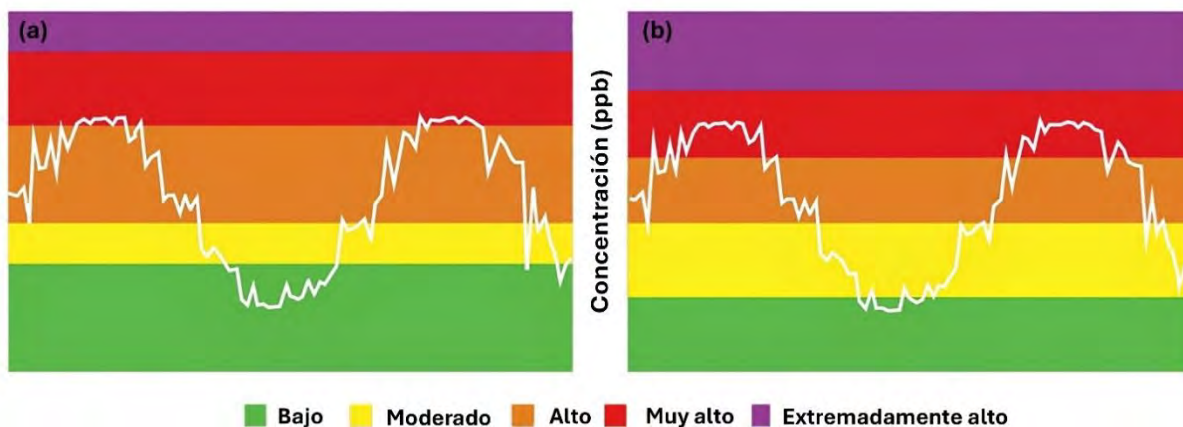


Figura 3. Comparativa entre los LMP de los sistemas IMECA (a) e Índice aire y salud (b). Fuente: Adaptado de Comisión Ambiental de la Megalópolis, (2020).

La situación del PM_{2.5} en México es especialmente preocupante, ya que, de acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del Aire de 2021 (SEMARNAT, 2024), este contaminante fue el que más frecuentemente superó los límites normados para la protección de la salud. La normativa

mexicana aplicable, la NOM-025-SSA1-2021, establece un LMP promedio anual de 10 µg/m³ para PM_{2.5}. Sin embargo, solo cuatro ciudades del país cumplen con estos lineamientos, mientras que 30 ciudades registran niveles que superan este límite, para este aspecto se puntualiza el grave estado que

presentan ciudades como Tijuana y la Zona Metropolitana de la Ciudad de México ya sus registros para el año de 2021 presentaron concentraciones que superaban el LMP por hasta tres veces su valor (Figura 4).

Comparando estos niveles con los establecidos por la EPA ($9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la OMS ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se observa que de acuerdo con informe presentado para el año 2021, solamente una ciudad cumplió con los límites establecidos internacionalmente.

Este escenario pone en evidencia la necesidad de reforzar las políticas y acciones para reducir la emisión de partículas finas, así como en abordar la urgente necesidad de abordar los riesgos que representan para la salud pública, ya que las mediciones y clasificaciones de la calidad del aire están directamente vinculadas con los impactos en la salud causados por el $\text{PM}_{2.5}$.

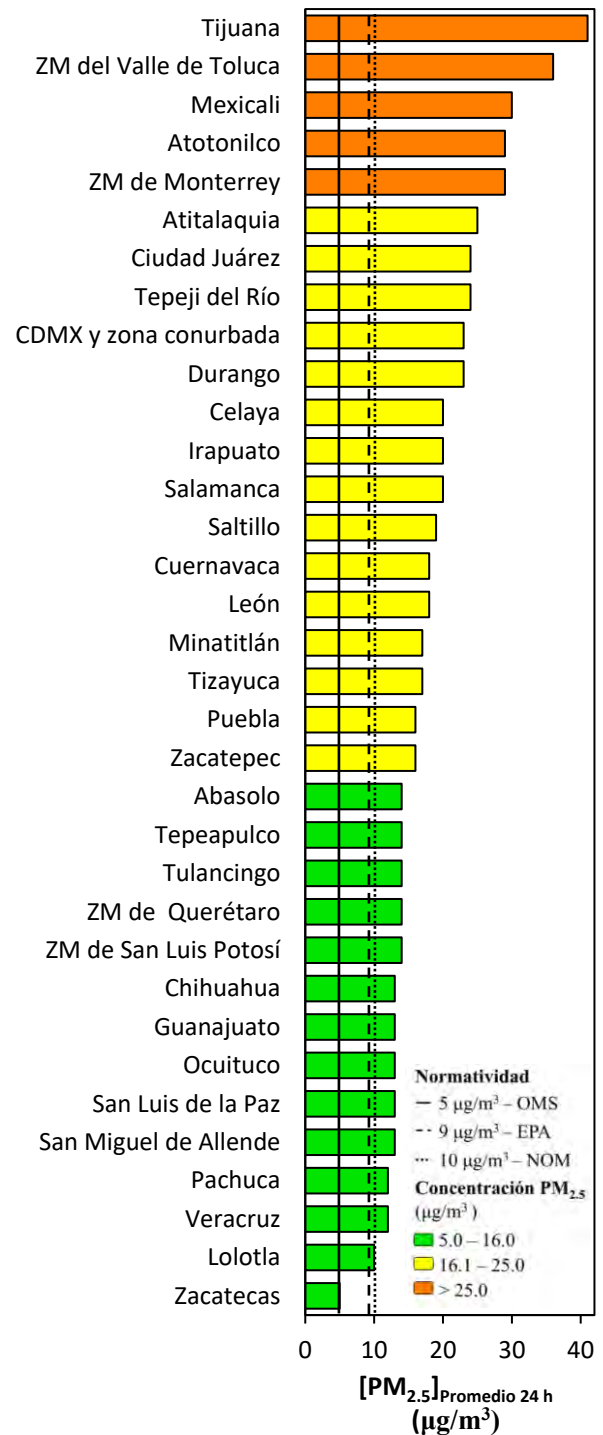


Figura 4. Evaluación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2021 en México para el año 2021. Fuente: SNIRN, (2024).

3.3 Impactos en la salud por PM_{2.5}

Debido a la problemática actual que enfrenta México, la exposición a altas concentraciones de partículas finas representa un grave riesgo para la salud humana. La susceptibilidad a estos riesgos es elevada, ya que las partículas ingresan al cuerpo principalmente a través del sistema respiratorio. Cuando una persona inhala aire contaminado, estas diminutas partículas, pueden penetrar profundamente en los pulmones, alcanzando los alvéolos (Figura 1), donde se realiza el intercambio de gases y debido a su tamaño extremadamente pequeño, el PM_{2.5} es capaz de evadir las defensas naturales del cuerpo, como los cilios y el moco, que normalmente atrapan partículas más grandes. Una vez en los alvéolos, estas partículas pueden ingresar al torrente sanguíneo, distribuyendo sus componentes tóxicos por todo el organismo.

Esta capacidad de penetrar tan profundamente en el cuerpo puede causar inflamación y contribuir al desarrollo de una variedad de problemas de salud, incluidos enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Thangavel y col., 2022; Vargas y col., 2017).

La exposición a PM_{2.5} no solo agrava enfermedades ya existentes, sino que también

está vinculada a un aumento en la incidencia y mortalidad de diversas afecciones. Entre las principales complicaciones se encuentran las enfermedades cardiopulmonares, como infecciones respiratorias, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y cáncer de pulmón. Tal y como se mencionó, la exposición a estas partículas induce inflamación en las vías respiratorias, lo cual compromete a la respuesta inmunitaria normal y afectando la capacidad del cuerpo para defenderse de infecciones (Kim y col., 2015). Lo anterior, puede contribuir al desarrollo de asma, ya que las partículas aumentan el estrés en los pulmones y generan inflamación, y como resultado, el cuerpo produce sustancias que agravan los síntomas del asma, lo que puede desencadenar crisis respiratorias en personas que ya son propensas a esta enfermedad (Thangavel y col., 2022).

Además, de afectar el sistema respiratorio, el PM_{2.5} puede generar sustancias dañinas dentro del cuerpo, conocidas como especies reactivas de oxígeno (ROS). Estas sustancias provocan un tipo de daño que afecta a las células y los tejidos, comprometiendo estructuras clave como el ADN y las proteínas. Con el tiempo, este daño puede alterar el funcionamiento normal de las

células, lo que contribuye al desarrollo de diversas enfermedades crónicas. De la misma manera, a largo plazo, la exposición a las PM_{2.5} también ha sido vinculada a alteraciones en el sistema hormonal. Estas partículas interfieren con la producción y regulación de hormonas esenciales, lo que puede afectar procesos como el metabolismo y debilitar el sistema inmunológico. Esto resalta la importancia de reducir la contaminación para proteger no solo los pulmones, sino todo el organismo (Thangavel y col., 2022).

Estos efectos subrayan la necesidad de abordar la contaminación por PM_{2.5} como un desafío prioritario en la salud pública, ya que no solo compromete la salud respiratoria, sino que también afecta al cuerpo de manera integral.

4. Conclusiones

La contaminación por PM_{2.5} en México representa un grave problema que afecta la salud pública de manera significativa. A pesar de la seriedad de esta situación, aún para el año de 2024 algunos Estados carecen de sistemas de monitoreo adecuados para informar a la población sobre la calidad del aire. Es fundamental que los ciudadanos se

concienticen sobre la importancia de utilizar las herramientas disponibles para conocer el estado del aire que respiramos. Además, de prestar atención a las alertas de contingencia, ya que ignorar estas advertencias podría presentar el riesgo a contraer problemas respiratorios y/o cardiovasculares. Solo a través de una mayor participación e información de la ciudadanía se podrá enfrentar esta problemática y proteger nuestra salud y bienestar.

Referencias bibliográficas

Comisión Ambiental de la Megalópolis. (2020). *Índice aire y salud: características y aplicación*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Diario Oficial de la Federación. (2019). *Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019. Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de noviembre de 2019. México: Secretaría de Salud.

Gobierno de México. (2017). *Clasificación de los contaminantes del aire ambiente*.

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS).

Environmental Protection Agency. (2024). *Technical assistance document for the reporting of daily air quality – the Air Quality Index (AQI)*. Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division.

Goldstein, A. H., Nazaroff, W. W., Weschler, C. J., y Williams, J. (2020). Indoor environments and air pollution exposure: A perspective. *Environmental Science & Technology*, 54(1), 1-10. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05727>

Health Effects Institute (2024). State of global air 2024: A special report on global exposure to air pollution and its health impacts, with a focus on children's health. <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2024). *Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/>

Kim, K.-H., Kabir, E., y Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment*

International, 74, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>

Mukherjee, A., y Agrawal, M. (2017). World air particulate matter: Sources, distribution and health effects. *Environmental Chemistry Letters*, 15(2), 283–309. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0611-9>

Organización Mundial de la Salud. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Resumen ejecutivo*. Organización Mundial de la Salud.

Saxena, P., y Sonwani, S. (2019). *Criteria air pollutants and their impact on environmental health*. Springer Singapore.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}*. Instituto Nacional de Ecología.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024). *Informe sobre la calidad del aire en México 2021*. Instituto Nacional de Ecología.

Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales. (2024). *Contaminación atmosférica. Promedio anual de*

concentraciones 24 h de $PM_{2.5}$. Consulta temática. México.

http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_23&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*

Thangavel, P., Park, D., y Lee, Y.C. (2022). Recent insights into particulate matter ($PM_{2.5}$) mediated toxicity in humans: An overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7511. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127511>

Vargas Buonfiglio, L. G., Mudunkotuwa, I. A., Abou Alaiwa, M. H., Vanegas Calderón, O. G., Borcharding, J. A., Gerke, A. K., Zabner, J., Grassian, V. H., y Comellas, A. P. (2017). Effects of coal fly ash particulate matter on the antimicrobial activity of airway surface liquid. *Environmental Health Perspectives*, 125(7), 077003. <https://doi.org/10.1289/EHP876>