

EL COSTO ULTRAFINO DE LA URBANIZACIÓN DEL AIRE EN PUEBLA Y LA CARRERA POR UN AIRE MÁS LIMPIO

THE ULTRAFINE COST OF URBANIZATION: AIR POLLUTION IN PUEBLA IN PUEBLA AND THE RACE FOR A CLEANER AIR

(1)José Guzmán-Linares, (1,2)Ivonne Ramírez-Díaz, (3)Marco Antonio Herrera-García, (3)Francisco Javier Solano-Huitzil, (1)Karla Rubio

(1)Laboratorio Internacional EPIGEN, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CONCYTEP), Instituto de Ciencias, Ecocampus, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla 72570, México; (2)Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), Doctorado en Biotecnología, Puebla, México; (3) Departamento de Monitoreo y Evaluación de Emisiones, Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, Gobierno del Estado de Puebla.

Karla Rubio*
José Guzmán*
epigen.concytep@puebla.gob.mx
josue.guzl98@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-9928-7747>
<https://orcid.org/0000-0002-3761-6445>
<https://orcid.org/0009-0001-6088-291X>
<https://orcid.org/0009-0009-4457-7489>
<https://orcid.org/0000-0002-8337-3106>

Recibido: 9 de Noviembre 2024
Revisado: 30 junio 2025
Publicado: 30 de Agosto 2025
A11N88.25/1003

Resumen

La contaminación del aire es un problema global con graves consecuencias para la salud humana. Los contaminantes como el polvo, el humo o los gases tóxicos afectan la esperanza de vida e incrementan la incidencia de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y diversos tipos de cáncer. Las ciudades, con su alta actividad industrial y tráfico vehicular, son especialmente vulnerables a estos efectos. Además, la contaminación atmosférica puede desplazarse a través de fronteras, afectando comunidades más allá de su origen, lo que convierte la protección del aire en una responsabilidad compartida. Para abordar esta problemática, se han implementado tecnologías y políticas de mitigación, como la prohibición de clorofluorocarbonos, la reducción de partículas emitidas por plantas de energía y la adopción de convertidores catalíticos en vehículos. Estos avances demuestran que mejorar la calidad del aire es posible mediante esfuerzos coordinados. Investigaciones en ciencias ómicas, como la genómica y epigenómica, ayudan a entender cómo los contaminantes afectan la salud a nivel molecular, permitiendo identificar biomarcadores de exposición y diseñar intervenciones preventivas y personalizadas. Este artículo examina la situación en la ciudad de Puebla, México, donde el crecimiento urbano y la actividad industrial elevan las emisiones de PM2.5 y PM10, partículas vinculadas con enfermedades crónicas. Se analizan las tendencias de estas emisiones y los esfuerzos locales e internacionales de mitigación. La meta es ofrecer una visión integral sobre el impacto de la contaminación del aire en la salud y destacar la urgencia de fortalecer las estrategias de control ambiental en áreas vulnerables.

Palabras clave: Contaminación, Salud, PM2.5, PM10, Ciencias ómicas, Epigenética, Exposoma, Política

Abstract

Air pollution is a global problem with serious consequences for human health. Pollutants such as dust, smoke and toxic gases affect life expectancy and increase the incidence of respiratory and cardiovascular diseases, as well as various types of cancer. Cities with their high industrial activity and vehicular traffic, are particularly vulnerable to these effects. Additionally, air pollution can travel across borders, affecting communities beyond its source, making clean air protection a shared responsibility. To address this issue, mitigation technologies and policies have been implemented, such as the ban on chlorofluorocarbons, reduction of particulate emissions from power plants, and adoption of catalytic converters in vehicles. These advances demonstrate that improving air quality is possible through coordinated efforts. Research in omics sciences, like genomics and epigenomics, helps us understand how pollutants impact health at the molecular level, enabling the identification of exposure biomarkers and the design of preventive and personalized interventions. This article examines the situation in Puebla, Mexico, where urban growth and industrial activity have raised PM2.5 and PM10 emissions, particles linked to chronic diseases. It analyzes the trends in these emissions and local and international mitigation efforts. The goal is to provide a comprehensive view of the impact of air pollution on health and emphasize the urgency of strengthening environmental control strategies in vulnerable areas.

1. Introducción

El aire es un recurso esencial, a menudo imperceptible en nuestro día a día. Solo lo notamos en forma de polvo suspendido, humo, cenizas o niebla en el ambiente. Estos elementos, junto con gases nocivos, vapores químicos y partículas biológicas, forman la contaminación del aire, un problema cuyas consecuencias para la salud y el medio ambiente han sido evidentes durante mucho tiempo. Hoy en día, los efectos adversos de la contaminación del aire se documentan cada vez más con relación a la esperanza de vida, así como al aumento en la incidencia de enfermedades, como distintos tipos de cáncer y enfermedades metabólicas cardiovasculares y pulmonares.

Las grandes ciudades, como centros de actividad humana e industrial, son especialmente vulnerables a la contaminación del aire. Esta contaminación a través de, por ejemplo, el humo generado por automóviles, actividades industriales, emisiones de volcanes, e incendios forestales, puede desplazarse a través de distintas fronteras políticas y geográficas, exponiendo a comunidades enteras a condiciones peligrosas sin importar su ubicación. Por lo tanto, proteger el aire limpio es una responsabilidad compartida a nivel local y global. Este esfuerzo implica monitorear los niveles de contaminación, comprender sus efectos en la salud humana, abordar su impacto en comunidades desfavorecidas y realizar cambios en nuestras ciudades y entornos para garantizar un aire más saludable.

Para muchas personas, la contaminación del aire es el precio de un desarrollo social y económico que, aunque deseado, suele ser desigual. La generación de energía, la agricultura intensiva, las prácticas modernas de construcción, el transporte y la industria son actividades que han traído beneficios, pero también han degradado la calidad del aire. No obstante, hay historias de éxito. Varias naciones han implementado regulaciones y han invertido en tecnologías de mitigación. Los avances incluyen

la prohibición internacional de los refrigerantes con clorofluorocarbonos, la reducción de partículas y dióxido de azufre provenientes de plantas de energía de carbón y la adopción de convertidores catalíticos que disminuyen las emisiones de óxidos de nitrógeno en vehículos. Estos logros muestran que existen herramientas y estrategias para mejorar la calidad del aire, si elegimos convertir esta tarea en una prioridad (Funk et al., 2024).

Estudios recientes en ciencias ómicas —disciplinas como la genómica, transcriptómica y epigenómica— están profundizando nuestra comprensión de los efectos de la contaminación del aire en la salud humana. Estas investigaciones permiten examinar cómo los contaminantes afectan los patrones de expresión génica, y consecuentemente provocan diversas patologías. Mediante estos estudios, los científicos pueden identificar biomarcadores específicos que revelan los impactos moleculares de la exposición a largo plazo, lo que facilita el diseño de intervenciones personalizadas y políticas de salud pública más efectivas para prevenir enfermedades inducidas por la contaminación (Meier et al., 2024).

La contaminación del aire es un problema complejo y multifacético, cuya solución requiere una combinación de políticas eficaces, tecnologías de mitigación y el compromiso colectivo. En particular, la contaminación por material particulado (PM por sus siglas en inglés) representa una de las amenazas más preocupantes para la salud pública. Estas partículas pueden medir de 10 a menos de 1 micrómetro de diámetro, por lo que son lo suficientemente pequeñas como para ingresar en las ramificaciones más pequeñas de los pulmones y, eventualmente, a otros órganos humanos. Numerosos estudios han vinculado la exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, incrementando el riesgo de problemas crónicos y reducción de la calidad de vida, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas.

Este artículo se enfoca en dos aspectos esenciales de la problemática de la contaminación del aire, aspectos que

abordamos mediante colaboraciones y proyectos disciplinarios con instituciones académicas y gubernamentales en nuestro grupo de investigación: 1) Examinar las tendencias específicas de emisiones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en estaciones de monitoreo de la ciudad de Puebla, un caso relevante dada su creciente urbanización y actividad industrial, así como el impacto directo de esta contaminación en la salud de sus habitantes; 2) recopilar y analizar los esfuerzos actuales para mitigar la contaminación del aire, con especial atención a las iniciativas globales y locales que han mostrado resultados positivos en la reducción de emisiones contaminantes. Al explorar los efectos de la exposición a $PM_{2.5}$ y PM_{10} , se pretende ofrecer una visión clara de las consecuencias en la salud pública y señalar la importancia de implementar y mejorar estrategias de mitigación en regiones vulnerables.

2. Contaminación por material particulado

2.1 Partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} y sus fuentes principales

Un ambiente limpio es esencial para el confort, la salud y el bienestar humano, así como para la estabilidad del clima. Sin embargo, tanto los países desarrollados como los países en vías de desarrollo enfrentan problemas de contaminación del aire que tienen un impacto significativo en la salud pública y en el clima. Uno de los contaminantes del aire más preocupantes es el material particulado, compuesto de pequeñas gotas líquidas o partículas sólidas suspendidas en la atmósfera (Zeb, B. et al., 2024).

El material particulado tiene diversas fuentes y puede entrar a nuestro organismo principalmente a través del sistema respiratorio (Figura 1). Las actividades humanas como la quema de combustibles, las refinерías de petróleo, el tráfico vehicular, las plantas de energía, las emisiones industriales y la quema de carbón y biomasa, contribuyen de manera fundamental. Sin embargo, también existen fuentes naturales, como el polvo

arrastrado por el viento, las emisiones volcánicas, los incendios forestales, restos de madera, polvo de suelo y la conversión de gases de origen biológico en partículas (Huang et al., 2024).

El material particulado puede liberarse directamente en la atmósfera como aerosoles primarios, o puede formarse dentro de la atmósfera a través de la conversión de gases en partículas, generando aerosoles secundarios (Huang et al., 2024). El material particulado se clasifica respecto a su tamaño: PM_{10} , con un diámetro igual o menor a 10 micras; $PM_{2.5}$, menor a 2.5 micras; y PM_1 , que incluye partículas de menos de 1 micra, también llamadas ultrafinas. La composición de estas partículas varía según su tamaño. Por ejemplo, las PM_1 contienen principalmente carbono y elementos provenientes del polvo de construcción y sustancias químicas liberadas por industrias cercanas a áreas de tráfico vehicular. En cambio, las partículas de $PM_{2.5}$ suelen incluir metales pesados, compuestos orgánicos, sulfatos, nitratos y amonio. Las PM_{10} , en su mayoría, están compuestas por partículas secundarias que se forman a partir de otras sustancias en la atmósfera (Gavito-Covarrubias et al., 2024).

El análisis de la composición química del PM es esencial para evaluar la calidad del aire en zonas urbanas e industriales y resulta clave para tomar medidas preventivas que protejan la salud pública. Sin embargo, su composición específica varía, ya que depende de factores como la región, el clima y las actividades humanas.

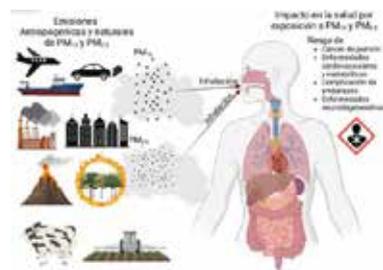


Figura 1: Fuentes de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Las actividades humanas, como la quema de combustibles, tráfico vehicular, emisiones industriales y la quema de carbón y biomasa, representan contribuciones signi-

ficativas de PM. A su vez, existen fuentes naturales, como el polvo arrastrado por el viento, emisiones volcánicas e incendios forestales. Elaboración propia en BioRender.

3. Tendencias de emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Puebla

3.1 Análisis de datos sobre emisiones en Puebla entre 2015-2024

Para llevar a cabo el análisis de emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Puebla, México, recopilamos datos crudos por hora provenientes de cinco estaciones de monitoreo de calidad del aire desde el 1 de enero de 2015 hasta el 30 de septiembre de 2024. Las cinco estaciones de monitoreo de las que se recopilaron los datos fueron: Agua Santa (Prolongación 11 sur y 121 poniente, Col. Agua Santa, Municipio de Puebla, C.P. 72490), BINE (Blvd. Hermanos Serdán No. 203, Col. Valle del Rey, Municipio Puebla C.P. 72140), Las Ninfas (23 poniente y 15 sur, Col. Santiago, Municipio de Puebla, C.P. 72410), UTP (Calle Mariano Escobedo s/n esq. Francisco I. Madero Col. Joaquín Colombres, Municipio de Puebla, C.P. 72300), Velódromo (Av. Zaragoza S/N entre Periférico Ecológico y Calle de las Flores, Municipio de Coronango. C.P. 72680) (Figura 2A). Estos datos fueron obtenidos a través de la Secretaría de Medio Ambiente Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT), y de la base de datos de SINAICA (Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire), que proporciona información detallada y en tiempo real sobre contaminantes atmosféricos (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2024). El número total de datos analizados en las 5 estaciones de monitoreo para PM_{2.5} de 2015 a 2024 correspondió a 429,179 horas con registros de emisiones, para PM₁₀ se obtuvo un total de 410,650 horas con registros de emisiones. En la Figura 2B-C se observan los porcentajes (%) de datos registrados y sin registro

para PM_{2.5} y PM₁₀.

Los promedios anuales por estación de monitoreo por estación de año de PM_{2.5} y PM₁₀ para Puebla desde 2015 hasta 2024, muestran una tendencia de valores anuales que superan consistentemente los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 (10 µg/m³ y 20 µg/m³, respectivamente). Así como los sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2021) para estas partículas en la atmósfera, siendo 5 µg/m³ y 15 µg/m³ respectivamente, con una tendencia de valores incrementados en las estaciones de invierno y primavera (Figuras 3 y 4).

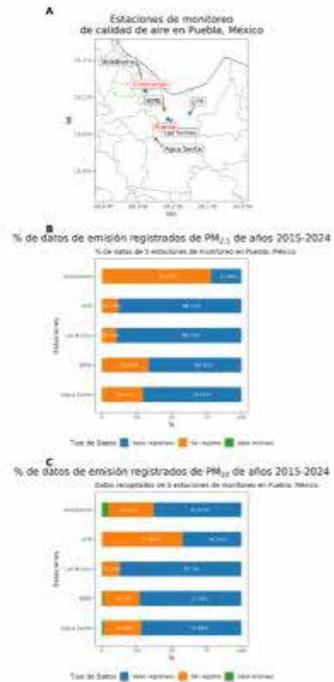


Figura 2: Ubicación de las cinco estaciones de monitoreo y porcentaje de tipos de datos de calidad del aire en Puebla, México. Datos obtenidos de la SMADSOT y de SINAICA. Valor erróneo incluye valores iguales a 0, representan <1% del total de datos de cada estación de monitoreo para PM_{2.5} y 1-5% para PM₁₀ (barras verdes), los cuales se convirtieron al valor mínimo de cada estación. Elaboración propia en R/RStudio.



Figura 3: Tendencias de emisiones de PM_{2.5} en Puebla, México, de los años 2015-2024. Datos crudos promediados por estación a lo largo de 9 años para 5 estaciones de monitoreo ambiental. Elaboración propia en R/RStudio.

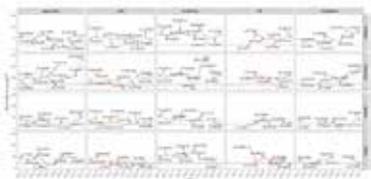


Figura 4: Tendencias de emisiones de PM₁₀ en Puebla, México, de los años 2015-2024. Datos crudos promediados por estación a lo largo de 9 años para 5 estaciones de monitoreo ambiental. Elaboración propia en R/RStudio.

4. Impacto en la Salud de la Exposición a PM 2.5 y PM10

La evidencia epidemiológica ha demostrado que la exposición a la contaminación del aire, incluyendo PM₁₀ y PM_{2.5}, dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂), se asocia con un amplio rango de enfermedades no transmisibles (ENT). Entre estos contaminantes, el material particulado ha sido clasificado como un riesgo de clase I para el cáncer de pulmón en humanos (Turner, M.C. et al., 2024). En términos generales, la contaminación por PM es uno de los principales factores de riesgo globales para diversas enfermedades, ya que se ha vinculado con presión arterial alta, riesgos incrementados por el tabaquismo, bajo peso al nacer y partos prematuros (Brauer, M. et al., 2024).

Para reducir el impacto de la contaminación en la salud, la Organización Mundial de la Salud (OMS) actualizó en 2021 sus Directrices Globales de Calidad del Aire,

basadas en décadas de evidencia sobre los efectos negativos de los contaminantes. Sin embargo, aún existe una escasez de estudios en países de ingresos bajos y medios, donde el 77% de las muertes por ENT se producen y la exposición a la contaminación es especialmente elevada. La OMS ha establecido que existe una relación casi lineal entre las concentraciones de PM_{2.5} y el riesgo para la salud, y se han observado efectos incluso a niveles bajos de concentración (<5 µg/m³), lo que subraya la importancia de reducir la contaminación al mínimo (World Health Organization, 2021).

Las ENT se han convertido en la principal causa de muerte a nivel mundial, con una incidencia creciente que representa casi 41 millones de muertes anuales. La contaminación del aire se considera el mayor riesgo ambiental para las ENT, y actualmente, el 99% de la población mundial está expuesta a niveles de calidad del aire que superan los límites recomendados por la OMS (World Health Organization, 2022).

La falta de opciones para reducir la exposición individual y las disparidades sociales agravan el problema, haciendo urgente el desarrollo de políticas de intervención en salud y estrategias de comunicación de riesgos. Sin medidas drásticas, los objetivos para mejorar la calidad del aire y la salud establecidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas para 2030 serán difíciles de alcanzar.

La exposición a la contaminación del aire afecta a distintos grupos poblacionales. Por ejemplo, más del 98% de los niños en países de ingresos bajos y medios (LMICs, por sus siglas en inglés) están expuestos a niveles de PM_{2.5} que exceden las directrices de calidad del aire (Aithal, S. S. et al., 2023). Esta exposición durante el desarrollo prenatal y postnatal podría tener consecuencias no visibles en la infancia, incrementando el riesgo de enfermedades no transmisibles a lo largo de la vida (Pérrera, F. et al., 2022). Además, la exposición de mujeres embarazadas a PM_{2.5} ha sido vinculada con complicaciones en el embarazo, como el nacimiento prematuro y la muerte fetal, e incluso algunos estudios sugieren una posible relación con problemas de fertilidad (Decrue, F. et al., 2023, Zanini, M. J. et al., 2020).

La exposición crónica a PM_{2.5} se ha asociado con un incremento en enfermedades neurodegenerativas, como el Alzheimer y la demencia vascular, así como en cáncer y trastornos óseos como la osteoporosis (Jain, S., 2024). La osteoporosis es una enfermedad que debilita los huesos, los hace propensos a fracturarse; esta condición ya es conocida como la “enfermedad silenciosa” debido a que suele detectarse sólo tras una lesión y afecta a millones de personas en el mundo. Diversos factores contribuyen a la osteoporosis, como los cambios hormonales, el sedentarismo y el consumo de tabaco y alcohol. Sin embargo, estudios recientes sugieren que la contaminación del aire podría ser un factor adicional. Investigaciones en Estados Unidos, Reino Unido, India y China han revelado que vivir en áreas con altos niveles de contaminación, especialmente de PM_{2.5} y carbono negro, aumenta el riesgo de fracturas y disminuye la densidad ósea. En países como India, donde el uso de estufas tradicionales y la quema de residuos agrícolas agravan la contaminación, esta relación podría tener implicaciones importantes para la salud pública. Los científicos aún investigan cómo los contaminantes del aire dañan los huesos. Entre las teorías, se plantea que el ozono puede bloquear la radiación ultravioleta, reduciendo la producción de vitamina D, esencial para la salud ósea. Además, algunos compuestos en el aire contaminado generan radicales libres que dañan las células y promueven inflamación, afectando los procesos de regeneración ósea (Jain, S., 2024).

Los estudios epidemiológicos en países de altos ingresos han sido fundamentales para establecer una relación causal entre la contaminación del aire y eventos adversos de salud. Sin embargo, en los países de bajos ingresos, donde los niveles de contaminación y la densidad poblacional son más altos, estos estudios son escasos, limitando las estimaciones globales de la carga de enfermedad por exposición prolongada a la contaminación. Para avanzar en esta área, es esencial realizar estudios de seguimiento a largo plazo en estos países de bajos ingresos. Así como mejorar la precisión en la evaluación de la exposición y promover el uso de tecnologías de secuenciación masiva que nos permitan realizar estudios multi-ómicos que nos

permitan comprender la complejidad de los sistemas biológicos y sus interacciones con la contaminación ambiental.

4.1 Exposoma y sus consecuencias sociales

El concepto de Exposoma, sugerido desde el año 2005, se refiere a la totalidad de las exposiciones de fuentes internas y externas, incluidos los agentes químicos, biológicos, físicos y sociales desde la concepción y a lo largo de toda la vida de un individuo. A pesar de que dichas exposiciones pueden ser compartidas entre individuos y grupos, cada uno responde fisiológicamente de manera específica y se ve afectados de manera diferente.

Los estudios centrados en el Exposoma tienen por objeto evaluar las correlaciones entre las exposiciones ambientales y las respuestas biológicas y de salud de una o más personas que viven en un contexto similar (Olmedo-Suárez et al., 2022; Lyon-Caen et al. 2019). El Exposoma está compuesto por tres dominios: el externo general, que examina las exposiciones a nivel de la población (como la contaminación en el aire y el agua); el externo específico, que se ocupa de exposiciones individuales (se miden por cuestionarios); y el interno, que estudia las respuestas biológicas a los factores externos e incluye análisis funcionales, biomoleculares y multi-ómicos (Anesti et al., 2023; Wei et al., 2022).

Las ciencias ómicas, como la transcriptómica y la epigenómica, desempeñan un papel crucial en los estudios del exposoma, ya que permiten investigar cómo las exposiciones ambientales afectan la expresión génica y los mecanismos de regulación genética en el organismo. La transcriptómica se centra en el análisis completo de los ARN transcritos en una célula o tejido en un momento dado, lo cual proporciona información sobre los genes que están activos o inactivos en respuesta a exposiciones específicas, como contaminantes del aire, químicos en el agua o agentes biológicos. Al estudiar los cambios en el perfil de expresión génica, la transcriptómica ayuda

a identificar rutas biológicas y procesos celulares alterados por estas exposiciones, revelando potenciales vínculos con enfermedades crónicas o condiciones de salud específicas.

Por otro lado, la epigenómica explora el conjunto de las modificaciones epigenéticas en forma de modificaciones químicas en el ADN que regulan la expresión génica, sin alterar la secuencia genética subyacente. Estas modificaciones, que incluyen metilación del ADN y modificaciones de histonas, son altamente sensibles a factores ambientales y pueden cambiar la actividad de ciertos genes en respuesta a exposiciones prolongadas o intensas. La Epigenética es fundamental en el contexto del exposoma porque permite entender cómo el ambiente "deja huellas" en el genoma que pueden tener efectos a largo plazo en la salud, incluso transmitiéndose de una generación a otra.

Ambas disciplinas, la transcriptómica y la epigenómica, aportan una comprensión más profunda de las respuestas biológicas al ambiente, ayudando a identificar biomarcadores específicos de exposición y riesgo de enfermedades. Esto no solo mejora la capacidad para predecir efectos de salud a nivel individual y poblacional, sino que también facilita el desarrollo de intervenciones y políticas que puedan mitigar los efectos adversos de las exposiciones ambientales.

5. Políticas y regulaciones: esfuerzos y estrategias de mitigación de los efectos de la contaminación del aire

Desde 1987, la Organización Mundial de la Salud, ha establecido periódicamente lineamientos sobre la calidad del aire que ayuden a los gobiernos y a la sociedad civil a tomar decisiones para reducir la exposición al aire contaminado y mitigar los efectos adversos a la salud. Desafortunadamente, las consecuencias tanto en salud como en ambiente por la contamin

ción del aire parecen afectar cada vez más pues existen limitaciones dentro de los lineamientos que la OMS establece, siendo que no se realizan recomendaciones que incluyan los efectos combinados de distintos tipos de exposiciones en distintos espacios y tiempos. Tampoco menciona recomendaciones específicas en políticas e intervenciones públicas, ya que estas dependen de contextos socioculturales determinados (WHO, 2021). Como claro ejemplo, el objetivo del Acuerdo de París es reducir el incremento de la temperatura global a tal grado de evitar catástrofes socioambientales sin precedentes para antes del 2030. Para esto, sería necesaria la implementación de un conjunto de políticas efectivas y decisivas a nivel de nación. Sin embargo, se sabe que las contribuciones realizadas a la fecha no han alcanzado las reducciones requeridas, pues el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) ha estimado que resta una brecha media de 23 gigatoneladas de CO₂ para el 2030 (The United Nations Environment Programme [UNEP], 2022). Por lo anterior, surge la pregunta de qué tipo de estrategias o políticas públicas serían las más efectivas para mitigar significativamente las emisiones de contaminantes.

Recientemente, Annika Stechemesser, investigadora del Instituto Potsdam para la Investigación del Impacto Climático en Alemania, junto con su equipo usaron inteligencia artificial para analizar 1500 políticas recopiladas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) implementadas entre 1998 y 2022 en 41 países, encontrando que 63 intervenciones realizadas en 35 países, en conjunto, condujeron a reducciones significativas de hasta 1.8 gigatoneladas de CO₂ (Stechemesser et al., 2024). En este trabajo, los autores concluyeron que es más eficaz utilizar la combinación adecuada de políticas que utilizar muchas de manera individual. Además, identificaron cuatro principales sectores de alto nivel de emisiones: la construcción, la eléctrica, la industria y el transporte. Por lo que las intervenciones combinadas en materia jurídica aplicadas a dichos sectores funcionaron mejor en ciertas regiones y economías. En Noruega, por ejemplo, se prohibió el tránsito de autos con motor de combustión con la paralela

reducción de los costos de los autos eléctricos, lo que motivó la transición al uso de energías más limpias (Larsen et al., 2023). Además, el aumento en impuestos o la implementación de costos fijos del carbono, como medidas independientes, lograron la reducción de emisiones de forma significativa.

La idea de contar con un inventario global de políticas efectivas se ve limitada por la falta de herramientas que evalúen sistemáticamente los efectos de la combinación simultánea de políticas ambientales. El modelo de evaluación basado en aprendizaje automático para identificar políticas efectivas identificó cuatro tipos de políticas en materia de información, precios, regulación y subsidios. Es importante mencionar que, aunque identificar políticas efectivas es crucial para guiar a los responsables del diseño de las intervenciones más significativas, se encontró que las políticas efectivas varían según el desarrollo económico de cada país. Por ejemplo, en las economías en desarrollo, la regulación es la política más poderosa, pues resulta ser efectiva como una política individual, pero lo es también en combinación con las políticas en subsidios, precios e información. En el sector industrial, la fijación de precios es más efectiva en economías desarrolladas, aunque puede mostrar mayor sinergia con otras políticas en economías en desarrollo (Stechemesser et al., 2024). Cabe señalar que en términos de sustentabilidad, el interés de los tomadores de decisiones de una nación por formular políticas ambientales conlleva generar intereses económicos sobre el desarrollo de tecnologías verdes. Así como en la reducción del costo de las tecnologías, lo que resultaría no solo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también en la disminución de liberación de material particulado al ambiente.

Por lo anterior, el gasto público en ciencia y tecnología es crucial para promover una mejor economía en México. Lo que resalta la necesidad de la participación de más actores en una política activa, en la que no solamente se involucre el gobierno para el diseño de políticas. La participación de la comunidad científica, por ejemplo, sería clave para mejorar estrategias en el diseño de políticas científicas y tecnológicas.

Se sabe que las naciones que han logrado el aumento de sus ingresos y que han contribuido en mejorar la calidad de vida de sus habitantes, lo han realizado a través de la inversión en actividades de investigación y desarrollo que no solo incluye a la investigación aplicada, sino además a la investigación básica y la investigación experimental. Sin embargo, México parece estar lejos de esta tendencia debido a los bajos recursos que el estado destina a la ciencia. Tal como lo evidencian estudios recientes, donde mencionan que en 2020 el presupuesto ejecutado en investigación y desarrollo ascendió apenas al 0.3% del producto interno bruto (PIB) (Villegas et al., 2023). Lo que es una cifra muy alejada a lo estipulado en el artículo 119 de la Ley General de Educación y el artículo 9 BIS de la Ley de Ciencia y Tecnología, donde señalan que el poder Ejecutivo Federal y el gobierno de cada entidad federativa, concurrirán al financiamiento equivalente al 1% del PIB en investigación científica y desarrollo tecnológico. Como consecuencia, México apenas cuenta con 358 investigadores por cada millón de habitantes (Vries W., 2024).

Si sumamos además la disparidad de género, donde del total de la comunidad científica hasta 2023 (41,284 investigadores registrados en el SNI) el 40% fue representada por mujeres (González et al., 2024). Encontramos que no solo se invierte poco en investigación, sino que además el direccionamiento de los proyectos llevados a cabo actualmente se ven sesgados por una falta de participación democrática y por la limitación al derecho humano a la ciencia, amparado por la Constitución en el apartado V del artículo 3º. El derecho humano al disfrute de los beneficios de la ciencia y el desarrollo tecnológico tendría que considerarse como principio base para el diseño de cualquier política científica. De este modo, lograríamos reducir las desigualdades en cualquiera de sus formas, incluyendo las disparidades en la salud relacionadas con la contaminación del aire (Mork et al., 2024).

6. Conclusiones y Perspectivas

6.1 Importancia de la educación, la concientización y el desarrollo de políticas sostenibles

En la actualidad, el mundo entero se enfrenta a importantes desafíos socioambientales, como la creciente presión sobre los ecosistemas, la disminución de la diversidad biológica, el cambio climático, la contaminación, la escasez de agua, la sobrepoblación, el manejo de residuos, las migraciones, la pobreza, las disparidades sociales, la violencia, el desempleo y la explotación laboral. Gudi-Mindermann et al. (2023) afirman que el concepto "socioexposoma" explica de manera más precisa el vínculo entre todos los factores y exposiciones socioambientales, sus implicaciones en la salud, los factores sociales y económicos. Además, dicho concepto reconoce que los determinantes sociales, que varían según las circunstancias temporales y espaciales, tienen un impacto en todos los tipos de exposiciones, lo que resulta en distinciones en la salud desde la infancia temprana (Moccia et al., 2023); por tanto, los estudios del socioexposoma integran la investigación sobre la equidad en la salud y la justicia ambiental para investigar el surgimiento, la perpetuación y la influencia de las desigualdades sociales (Deguen et al., 2022).

El efecto negativo, subestimado, de las enfermedades asociadas a la contaminación en los programas sanitarios sociales es, por tanto, significativo. Las transformaciones socioeconómico-territoriales ocurridas en las grandes ciudades, como en Puebla, presentan como eje explicativo central la industria impulsada desde la década de los 70. Durante 50 años, su impacto ahora se hace visible a través de estudios epidemiológicos, pero faltan análisis científicos multi-escala y marcadores moleculares para abordar desde

el punto de vista médico y científico las dimensiones sociales (y económicas) de generaciones actuales y venideras que presentarán patologías asociadas a la contaminación regional. Los estudios multidisciplinarios son necesarios para reconocer áreas de oportunidad para la toma de decisiones sanitarias oportunas, así como el establecimiento de nuevas líneas de investigación.

La contaminación es costosa a nivel individual y social. Las enfermedades relacionadas con la contaminación causan pérdidas de productividad que reducen el PIB en los países de ingresos bajos-medios hasta en un 2% anual. Las enfermedades relacionadas con la contaminación también generan costos de atención médica que son responsables del 1.7% del gasto anual en salud en los países de ingresos altos y de hasta el 7% del gasto en salud en los países de ingresos medios con alta tasa de contaminación ambiental y desarrollo exponencial (Landrigan et al., 2018). Los costos atribuidos a las enfermedades relacionadas con la contaminación probablemente aumentarán a medida que se identifiquen asociaciones adicionales entre la contaminación y las enfermedades.

6.2 Reflexión sobre la necesidad de estudios multidisciplinarios para mejores diagnósticos, terapias y biomarcadores eposómicos de salud ambiental

La contaminación es la principal causa ambiental de enfermedades humanas y muerte prematura en el mundo (Landrigan et al., 2017). Según la OMS, se estima que 7 millones de muertes prematuras en todo el mundo están asociadas con la contaminación del aire y el agua cada año, principalmente de varios subtipos de cáncer, enfermedades pulmonares, cardiopatías, accidentes cerebrovasculares, hepatitis, insuficiencia renal, infertilidad e infecciones respiratorias

agudas (Organización Mundial de la Salud, 2024). Es importante destacar que un estimado del 24% de las muertes asociadas a la contaminación se pueden prevenir. Desde la perspectiva epidemiológica, las enfermedades causadas por la contaminación causan más muertes que el SIDA, la tuberculosis y la malaria juntos, y 15 veces más que las causadas por guerras o violencia (Organización de las Naciones Unidas, 2022). Desde la perspectiva social, la contaminación mata de manera desproporcionada a los sectores pobres y vulnerables de la sociedad. Las industrias contribuyen en gran medida a la contaminación del aire, el agua y el suelo en México, por una diseminación incontrolada de sustancias altamente tóxicas que inducen enfermedades terminales.

Los estudios multidisciplinarios son necesarios para reconocer áreas de oportunidad para la toma de decisiones sanitarias oportunas, así como el establecimiento de nuevas líneas de investigación, como en el campo de la Epigenética. Debido a que las adaptaciones y cambios epigenéticos en las células son pequeños, potencialmente acumulativos y pueden desarrollarse con el tiempo, puede ser difícil establecer las relaciones de causa-efecto entre factores ambientales, cambios epigenéticos y enfermedades humanas. Por lo tanto, existe una gran necesidad de enfoques sistemáticos para este conjunto de enfermedades. Además, los niños corren un alto riesgo de desarrollar enfermedades asociadas a la contaminación, inclusive la exposición a dosis extremadamente bajas de contaminantes durante ventanas específicas de vulnerabilidad intrauterina, y en la infancia temprana, puede provocar enfermedades severas, discapacidades de por vida y un sensible incremento de muerte infantil. En particular, la exposición neonatal a las toxinas epigenéticas puede influir en la salud adulta en el futuro, debido a las características intrínsecas de estas toxinas, que alteran la regulación

epigenética durante la organogénesis y en general durante el desarrollo.

A pesar de los efectos sustanciales de la contaminación en la salud humana, en la economía y el medio ambiente en Puebla, en México y en el mundo, los efectos de la contaminación no se han analizado con el propósito de proponer nuevas estrategias terapéuticas basadas en estudios epigenéticos integrados con ciencias médicas y ambientales. De ahí la próxima iniciativa gestada desde el Laboratorio Internacional EPIGEN-CONCYTEP-BUAP para la creación de la Red Latinoamericana del Exposoma Humano, tras el 1er Congreso Internacional ENVIRO-EpiHealthMX2024, llevado a cabo en la ciudad de Puebla, México, para discutir esta necesidad desde lo científico y lo social (ENVIRO-EpiHealthMX2024, 2024). En los países de ingresos bajos y medios, los efectos de la contaminación en la salud se subestiman para las estadísticas de morbilidad a nivel internacional. Teniendo en cuenta que el número de muertes prematuras y discapacidades causadas por muchas de las condiciones clínicas asociadas a la contaminación no se cuantifica actualmente en las estimaciones globales, se espera que la carga de morbilidad por la contaminación del aire y el agua ambiental aumente considerablemente. Por lo tanto, existe una gran necesidad de enfoques sistemáticos para el conjunto de enfermedades asociadas al Exposoma Humano. La disección de la relación entre las propiedades tisulares, celulares y subcelulares alteradas, y el fenotipo de enfermedades como el cáncer, podrían explorarse como una estrategia para el desarrollo de nuevos enfoques bioterapéuticos para el diagnóstico y posible tratamiento de esta enfermedad que afecta a grupos social y económicamente vulnerables.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Convenio CONCYTEP (203/2024), Becas de Formación Profesional, VIEP-BUAP (0851-2023), Beca Nacional de Posgrado, CONAHCYT (752965), nombramiento SNI I (294738).

Referencias

- Funk, M. A., Ash, C., Smith, J., Uzogara, E., & Wible, B. (2024). Clearing the air. *Science*, 385(6707), 378-379.
- Meier, M. J., Harrill, J., Johnson, K., Thomas, R. S., Tong, W., Rager, J. E., & Yauk, C. L. (2024). Progress in toxicogenomics to protect human health. *Nature Reviews Genetics*, 1-18.
- Zeb, B., Ditta, A., Alam, K., Sorooshian, A., Din, B. U., Iqbal, R., ... & Elshikh, M. S. (2024). Wintertime investigation of PM10 concentrations, sources, and relationship with different meteorological parameters. *Scientific Reports*, 14(1), 154.
- Gavito-Covarrubias, D., Ramírez-Díaz, I., Guzmán-Linares, J., Limón, I. D., Manuel-Sánchez, D. M., Molina-Herrera, A., ... & Rubio, K. (2024). Epigenetic mechanisms of particulate matter exposure: air pollution and hazards on human health. *Frontiers in Genetics*, 14, 1306600.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2024). Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). <https://sinaica.inecc.gob.mx/>
- SECRETARÍA DE SALUD. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de octubre de 2021.
- World Health Organization (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
- Turner, M. C., Andersen, Z. J., Baccarelli, A., Diver, W. R., Gapstur, S. M., Pope III, C. A., ... & Cohen, A. (2020). Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations. *CA: a cancer journal for clinicians*, 70(6), 460-479.
- Brauer, M., Roth, G. A., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abate, K. H., Abate, Y. H., ... & Amani, R. (2024). Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and 811 subnational locations, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, 403(10440), 2162-2203.
- World Health Organization, “Billions of people still breathe unhealthy air: New WHO data” (WHO, 2022); <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>.

- Aithal, S. S., Sachdeva, I., & Kurmi, O. P. (2023). Air quality and respiratory health in children. *Breathe*, 19(2).
- Perera, F., & Nadeau, K. (2022). Climate change, fossil-fuel pollution, and children's health. *New England Journal of Medicine*, 386(24), 2303-2314.
- Decrue, F., Townsend, R., Miller, M. R., Newby, D. E., & Reynolds, R. M. (2023). Ambient air pollution and maternal cardiovascular health in pregnancy. *Heart*, 109(21), 1586-1593.
- Zanini, M. J., Domínguez, C., Fernández-Oliva, T., Sánchez, O., Toda, M. T., Foraster, M., ... & Llurba, E. (2020). Urban-related environmental exposures during pregnancy and placental development and preeclampsia: a review.
- Jain, S. (2024). Down to the bone. *Science (New York, NY)*, 385(6707), 359-361.
- Olmedo-Suárez, M. Á., Ramírez-Díaz, I., Pérez-González, A., Molina-Herrera, A., Coral-García, M. Á., Lobato, S., ... & Rubio, K. (2022). Epigenetic regulation in exposome-induced tumorigenesis: emerging roles of ncRNAs. *Biomolecules*, 12(4), 513.
- Lyon-Caen, S., Siroux, V., Lepeule, J., Lorimier, P., Hainaut, P., Mossuz, P., ... & SEPAGES Study Group. (2019). Deciphering the impact of early-life exposures to highly variable environmental factors on foetal and child health: design of SEPAGES couple-child cohort. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(20), 3888.
- Wei, X., Huang, Z., Jiang, L., Li, Y., Zhang, X., Leng, Y., & Jiang, C. (2022). Charting the landscape of the environmental exposome. *IMeta*, 1(4), e50.
- UNEP. (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window. Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies. UN.
- Stechemesser A, Koch N, Mark E, Dilger E, Klösel P, Menicacci L, Nachtigall D, Pretis F, Ritter N, Schwarz M, Vossen H, Wenzel A. Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. *Science*. 2024 Aug 23;385(6711):884-892. doi: 10.1126/science.adl6547. Epub 2024 Aug 22. PMID: 39172830.
- Larsen, M. L., & Dupuy, K. (2023). Greening industry: Opportunities and challenges in electricity access for Norwegian industry firms. *Journal of Cleaner Production*, 396, 136534.
- Villegas, E. S. L. (2023). La política de innovación como determinante del crecimiento económico en los inicios del siglo XXI: caso México y Corea del Sur. *China Global Review*, 1(2), 76-102.
- Vries, W. D. (2024). Cien números sobresalientes. *Revista mexicana de investigación educativa*, 29(100), 25-31.

- González, M. D. L. Á. A. (2024). V. Condiciones laborales de las investigadoras en México, un enfoque desde la perspectiva de género. Juan Carlos Ramos Corchado Director del Centro Universitario UAEM Texcoco.
- Mork, D., Delaney, S., & Dominici, F. (2024). Policy-induced air pollution health disparities: Statistical and data science considerations. *Science (New York, N.Y.)*, 385(6707), 391–396.
- Gudi-Mindermann, H., White, M., Roczen, J., Riedel, N., Dreger, S., & Bolte, G. (2023). Integrating the social environment with an equity perspective into the exposome paradigm: a new conceptual framework of the Social Exposome. *Environmental Research*, 233, 116485.
- Moccia, C., Pizzi, C., Moirano, G., Popovic, M., Zugna, D., d'Errico, A., ... & Maule, M. (2023). Modelling socioeconomic position as a driver of the exposome in the first 18 months of life of the NINFEA birth cohort children. *Environment International*, 173, 107864.
- Deguen, S., Amuzu, M., Simoncic, V., & Kihal-Talantikite, W. (2022). Exposome and social vulnerability: an overview of the literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3534.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J., Adeyi, O., Arnold, R., Baldé, A. B., ... & Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The lancet*, 391(10119), 462-512.
- Organización Mundial de la Salud. (2024). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Recuperado el 7 de noviembre de 2024 de [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 de las Naciones Unidas. (2022, 7 de febrero). La contaminación del aire provoca siete millones de muertes cada año. Noticias ONU. Recuperado de <https://news.un.org/es/story/2022/02/1504162>
- ENVIRO-EpiHealthMX2024 (2024). Recuperado el 6 de noviembre de 2024, de <https://enviroepihealth.com/>