

spinor

CONTAMINACIÓN DEL AIRE

mayo | junio 2025

BUAP

60

Directorio

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Rectora

Dra. Ma. Lilia Cedillo Ramírez

Secretario General

Mtro. José Manuel Alonso Orozco

Vicerrector de Investigación y Estudios de Posgrado

Mtro. Ygnacio Martínez Laguna

Directora General de Estudios de Posgrado

Dra. Yadira Navarro Rangel

Directora General de Investigación

Dra. Ma. Verónica del Rosario Hernández Huesca

Director General de Divulgación Científica

Dr. Arturo Fernández Téllez

CONSEJO EDITORIAL

Editor responsable:

Dr. Arturo Fernández Téllez

Editor:

Biol. A. Eduardo Pineda Villanueva

Dirección de Divulgación científica

Revisores:

Dr. Agustín García Reynoso

Instituto de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

Dr. Jorge Alejandro Fernández Pérez

Instituto de Ciencias, BUAP

Dr. Daniel José Nisperuza Toledo

Tecnológico de Antioquia, Colombia

Dra. Cecilia Conde

Instituto de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

Dra. Elda Luyando López

Instituto de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

Diseño gráfico:

Mtro. Daniel Arenas

Mtro. Eduardo Conrado Picazo

Centro de Innovación y Creatividad BUAP

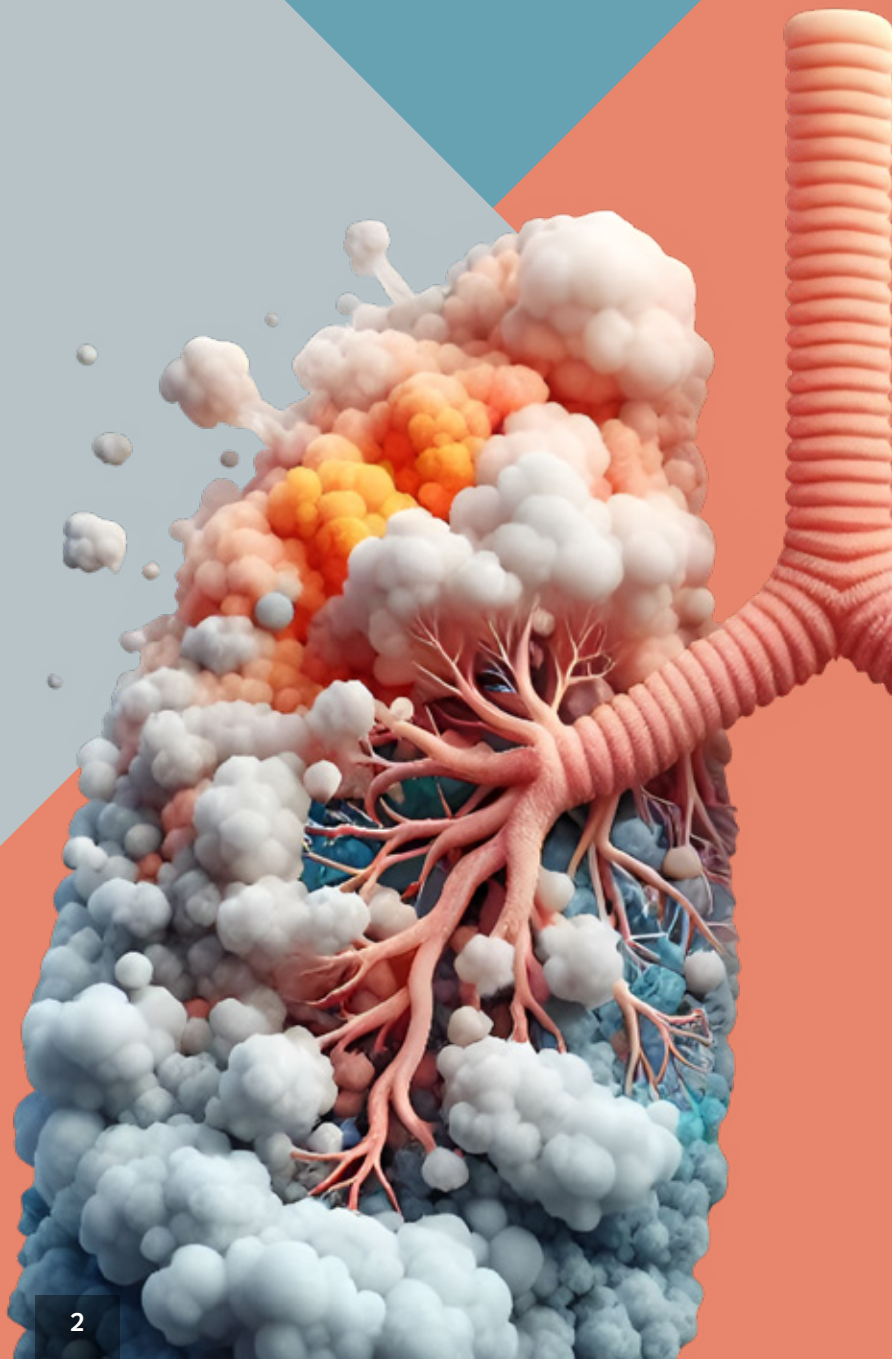
Martha Patricia Nepamuceno Ramírez

Sandra Islas Cruz

María José de Jesús Martínez Sánchez

Diego Angel Leon Esquivel

Brenda Vázquez Prado





05

¿Sabías que el clima depende de los aerosoles?



12

Caracterización y calibración de dispositivos de medición de partículas de aerosoles

19

Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en Puebla



27

El efecto de la humedad y el viento sobre la cantidad de partículas de aerosoles y los modelos de calidad del aire



37

¿Estamos respirando, comiendo y bebiendo microplásticos?



46

Calidad del aire en Puebla, su impacto en pacientes con asma alérgica

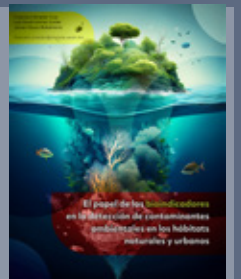
58

La conexión silenciosa entre la contaminación del aire por partículas de aerosoles y la obesidad en Puebla



66

El papel de los bioindicadores en la detección de contaminantes ambientales en los hábitats naturales y urbanos



71

Ciencia en la calle: Yo puedo medir lo que respiro



78

La relación entre la contaminación del aire por material particulado y la salud de la vegetación urbana

Cintillo legal

SPINOR, año 14, núm 60, mayo-junio de 2025, es una difusión periódica editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 sur número 104, Col. Centro, C.P. 72000, Puebla, Pue. Y difundida a través de la Dirección General de Divulgación Científica de la VIEP, con domicilio en Torre de Gestión Académica y Servicios Administrativos, 6° piso, Avenida San Claudio No. 1401, Ciudad Universitaria, Puebla, Puebla, C.P. 72592, Tel. (52) (222) 2295500 ext. 5714. www.viep.buap.mx, correo electrónico: revistaspinor@gmail.com

Reserva de derechos: 04-2023-122013395800-203 ISSN: (en trámite), ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Cultura. Editor responsable: Dr. Arturo Fernández Téllez, arturo.fernandez@correo.buap.mx. Responsable de la última actualización de este número: Dr. Arturo Fernández Téllez, domicilio en Torre de Gestión Académica y Servicios Administrativos, 6o piso, Avenida San Claudio No. 1401, Ciudad Universitaria, Puebla, Puebla, C.P. 72592, fecha de última modificación, junio de 2025. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de la revista SPINOR ni de la BUAP.

Carta de presentación

Estimados lectores:

En esta edición de la revista Spinor, les presentamos una colección de textos que abordan la contaminación del aire: lo que respiramos y sus impactos silenciosos. A través de distintas miradas, los contenidos reunidos en este número nos invitan a reflexionar sobre la calidad del aire que nos rodea, su monitoreo y los efectos que puede tener en nuestra salud y en el medio ambiente.

El aire que respiramos forma parte de nuestra vida cotidiana. Lo damos por sentado, pero rara vez nos detenemos a pensar en su calidad o en cómo puede afectarnos. En este número temático, conformado por diez aportaciones de divulgación, exploramos más a fondo un problema urgente y complejo: la contaminación del aire, con énfasis en las partículas de aerosoles y sus efectos en nuestras ciudades, nuestra salud y el entorno natural.

Los primeros textos se centran en las herramientas para medir la calidad del aire, los tipos de tecnologías disponibles y el papel activo que puede desempeñar la ciudadanía en su monitoreo. Desde redes ciudadanas en Puebla hasta experimentos que estiman cuántas partículas inhalamos al caminar por el centro histórico, estos trabajos nos muestran que medir el aire es el primer paso para cuidarlo.

También se analizan las consecuencias de respirar aire contaminado. ¿Sabías que existe una relación entre la exposición a partículas y enfermedades como el asma o incluso la obesidad? La ciencia está empezando a descubrir conexiones que antes pasaban desapercibidas, y los textos aquí reunidos nos ayudan a comprender cómo la contaminación puede afectarnos de maneras silenciosas, pero profundas.

Finalmente, este número nos lleva más allá de lo humano. Varios de los trabajos presentados examinan cómo el aire sucio afecta a otras formas de vida y al entorno que compartimos. Se abordan temas como el uso de bioindicadores para detectar contaminantes en espacios naturales y urbanos, la presencia de microplásticos en el polvo que flota en nuestras calles y los efectos nocivos de la contaminación en la vegetación urbana.

Respirar es vivir, y entender lo que respiramos es el primer paso para proteger nuestra salud y la del planeta. Esperamos que estas páginas despierten tu curiosidad y te animen a involucrarte en la construcción de ciudades más limpias y sostenibles.

Marco Antonio Mora Ramírez
Jenaro Reyes Matamoros

¿Sabías que el clima del planeta

depende de los aerosoles?

Yedid Zambrano Medina
Francisco Amador-Cruz
Luis Alberto Rendón

marco.mora@correo.buap.mx

Los aerosoles y sus fuentes de emisión

El aire de la atmósfera está constituido por un 79 % de Nitrógeno, 21 % de Oxígeno y, del uno por ciento restante, por una serie de gases raros como el Argón (Ar), el Helio (He) y el Hidrógeno (H_2) y, en mucha menor proporción, por otros gases como los denominados gases de efecto invernadero entre los que destacan el dióxido de Carbono (CO_2) y el Metano (CH_4). Pero también, además de gases, en la atmósfera hay aerosoles, que se definen como partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, y que aun cuando son mucho más grandes que los gases, pueden penetrar el tracto respiratorio y digestivo y penetrar en los organismos, causando muchas veces daños celulares y por ende problemas en salud, ocasionando muertes prematuras en el mundo.

Entonces, los aerosoles, son partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire que se pueden catalogar de acuerdo con su origen, ya sea humano (antropogénico) o natural (Andrae et al., 1997). En el caso de los aerosoles de origen antropogénico tenemos ejemplos como el humo del cigarro, el humo que proviene de la quema de leña o carbón, el humo que es producto de la quema de combustibles fósiles como el que se generan de los escapes de los automóviles, los fertilizantes que se rocían a las plantas, el humo de una carne asada, emisiones de las chimeneas de las fábricas, o el polvo que se genera cuando ranuran el concreto en las calles. Por otra parte, las fuentes naturales de aerosoles son, por ejemplo, las emisiones de polvo y ceniza del volcán Popocatepetl, el humo de los incendios de los bosques, el ahora más o menos bien conocido polvo que llega a México desde otro continente, y por ejemplo una fuente natural de aerosoles que casi nadie adivina es el mar pero que es sumamente importante en la regulación del clima del planeta. Si, de hecho, el mar genera aerosoles marinos, cuando las olas del mar chocan entre sí y producen un jet o chorro de agua que forma gotitas de agua que flotan en el aire (un aerosol). Este fenómeno, es muy importante para que se puedan producir nubes; resulta que las gotas de agua de mar contienen elementos químicos (sulfatos) que promueven la formación de nubes. En fin, estos son ejemplos de fuentes de generación (humana o natural) de aerosoles. En la siguiente sección de este artículo veremos que también es posible que los aerosoles se formen a partir de reacciones químicas entre elementos presentes en la atmósfera y bajo ciertas condiciones ambientales.



Por diversas razones, las partículas (líquidas o sólidas) que componen a los aerosoles se clasifican de acuerdo con su tamaño en tres categorías. Por ejemplo, las *partículas gruesas* o PM_{10} tienen un diámetro de hasta $10\ \mu\text{m}$, recordando que un micrómetro es igual la millonésima parte de un metro ($1 \times 10^{-6}\ \text{m}$) y entre ellas podríamos mencionar granos de arena de la playa o del desierto. Comúnmente las PM_{10} tienen sus fuentes de emisión en la combustión, el polvo de los caminos y los incendios, entre otros. Hay partículas más pequeñas, que se denominan *partículas finas* y que fácilmente pueden ser inhaladas y penetrar hasta los pulmones y el sistema circulatorio. Dichas partículas tienen diámetros menores a $2.5\ \mu\text{m}$ y sus principales fuentes de emisión constituyen cualquier actividad que queme combustibles fósiles o biomasa, como en los incendios forestales. Es difícil imaginar que tan pequeñas pueden ser estas partículas, por eso en la Figura 1 se presentan los tamaños relativos de las PM_{10} y $PM_{2.5}$ en comparación con el tamaño de un cabello humano. Nótese que un cabello humano tiene un diámetro de entre $50\text{-}70\ \mu\text{m}$, y que a lo largo de este diámetro podrían caber hasta cinco esferas de diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$, es decir a lo largo del diámetro de un cabello humano cabrían cinco partículas de tamaño PM_{10} representadas con los círculos en amarillo. A su vez, en una partículas PM_{10} cabrían cuatro partículas $PM_{2.5}$.

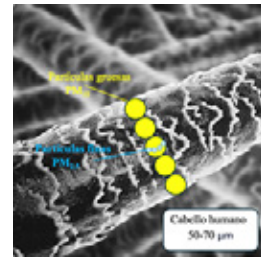


Figura 1. Imagen de un cabello humano de diámetro entre $50\text{-}70$ micrómetros, donde podrían caber hasta cinco esferas (amarillo) que representan el tamaño de una partícula gruesa (PM_{10}). A su vez en el diámetro de una partícula gruesa cabrían hasta cuatro partículas finas ($PM_{2.5}$).

Es necesario enfatizar la variación de tamaños de las partículas que componen a los aerosoles, ver Figura 2. Además de las partículas finas, existen unas todavía más pequeñas, que son las denominadas partículas ultrafinas, o $PM_{1,0}$ que son todas aquellas fracciones de algún material que tengan diámetros menores a $1 \mu m$, tan pequeñas como el tamaño de un virus. Continuando en la escala de tamaños, podríamos pensar que después de las partículas del tamaño de un virus, tendríamos fracciones de materia de humo de los incendios, o más grandes como las bacterias (que son diminutas), o mucho más grandes como el polen hasta llegar al tamaño de un cabello humano. Para darnos una buena idea de

cuanto varía el tamaño de las partículas, multiplicamos por el mismo factor a cada uno de los tamaños de los elementos que aparecen la figura 2. En este caso el virus del Zika tendría un tamaño de un chícharo, el coronavirus tendría el tamaño de una pelota de golf, las bacterias más pequeñas serían como del tamaño de la estatura de una persona, los granos de polen tendrían las dimensiones de una habitación y finalmente el cabello humano, sería del tamaño de un edificio de 20 pisos. En este sentido es claro que las partículas que componen a los aerosoles tienen una variación muy grande de sus dimensiones.

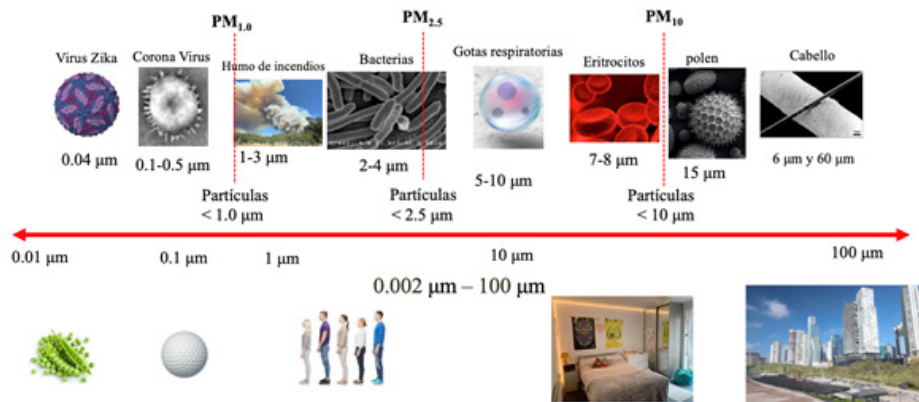


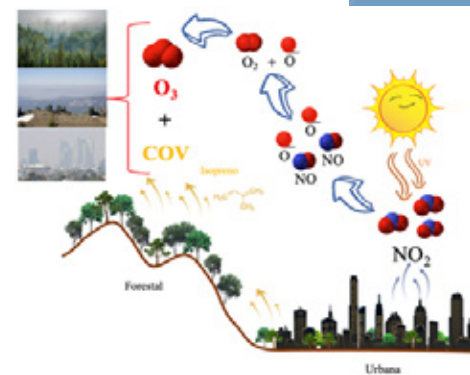
Figura 2. Ejemplos de elementos (virus, humo, bacterias, gotas, etc.) para ejemplificar los tamaños de las partículas de aerosoles, excepto por los eritrocitos, todos estos elementos se pueden encontrar en el aire. En la parte de abajo se muestran

Ahora hablemos de cuánto tiempo los aerosoles permanecen en la atmosfera (Jia, 2014). Por ejemplo, sabemos por las noticias que, en la ciudad de Cancún, han ocurrido episodios donde el cielo se torna rojizo, esto se debe a la presencia de partículas de polvo y arena que son transportadas desde el desierto del Sahara en África, lo cual significa que algunos aerosoles pueden permanecer hasta meses en la atmosfera. En el caso de las gotas de saliva que expulsamos cuando respiramos, hablamos, o gritamos, sabemos que el tiempo que permanecen en el aire es del orden de semanas u horas dependiendo de las condi-

ciones ambientales. Este dato fue determinante para establecer medidas para mitigar el contagio de casos de COVID-19 durante la pandemia, ya que como recordaremos se determinó que una de las principales vías de contagio o de propagación del virus era la vía aérea. Se recomendaba ventilar bien los espacios, para propiciar que los aerosoles (gotas de saliva) se depositaran lo más pronto posible. El depósito de los aerosoles depende en gran medida de la humedad y el viento (Ramanathan et al., 2001). En fin, que el tiempo de vida de los aerosoles en la atmosfera, va desde los minutos hasta los meses.

Formación de aerosoles

Es muy importante resaltar que, dentro de la complejidad del tema de los aerosoles, su presencia en la atmosfera no solamente se explica por las fuentes de emisión de estos, como las que ya se han comentado, sino que también se pueden formar a partir de reacciones químicas. Ahora comentaremos sobre un ejemplo de un conjunto de “cosas” (mecanismo químico) que podrían ocurrir en el aire que se intercambia entre una ciudad y una zona de bosques. La historia de la fisicoquímica de este mecanismo de formación de los aerosoles comienza con las emisiones vehiculares de dióxido de nitrógeno (NO_2) en los centros urbanos, el NO_2 es una molécula que posee dos átomos de oxígeno y uno de nitrógeno. Sin embargo, en presencia de la luz del sol, se puede desprender un átomo de oxígeno ($\text{NO}_2 + \text{luz} \rightarrow \text{NO} + \text{O}$), que rápidamente interactúa con el aire que está en la atmosfera que es rico en oxígeno molecular (O_2) y entonces se combina químicamente ($\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$) para formar una molécula con tres oxígenos, es decir ozono (O_3). Esto significa que las emisiones de los vehículos son precursoras de la formación de ozono, que es un contaminante secundario -que se formó a partir de las emisiones vehiculares. Ahora bien, mientras esto sucede en el aire de una zona urbana, en el bosque huele muy bien. Si, el bosque tiene un olor muy peculiar, los pinos tienen un olor tan característico que incluso se ha copiado este olor en aromatizantes, o productos de limpieza. Pero ¿qué les da este olor tan característico a los pinos? La respuesta es que los pinos contienen sustancias llamadas *terpenos*, y estos pertenecen a un grupo denominado compuestos orgánicos volátiles (COV). De manera que los bosques de pino emiten COV. Bueno, pues el ozono que se formó en las zonas urbanas puede reaccionar casi inmediatamente con las emisiones de COV de los bosques y formar aerosoles. Esta una de las maneras, no la única, que explica porque vemos neblinas en los bosques. Para el lector interesado, en replicar este mecanismo de formación de aerosoles en el laboratorio universitario se puede consultar a Mora-Ramírez et al., (2023).



la
es.

Aerosoles y el clima del planeta

Si bien es cierto, la mayoría de nosotros hemos escuchado que los gases de efecto invernadero (GEI) producen el calentamiento del planeta, realmente muy pocos saben que los aerosoles contribuyen al enfriamiento del planeta (Haywood et al., 2016). Por ejemplo, en el contexto dramático del calentamiento global, las erupciones volcánicas no son el villano de esta obra dramática. En 1991 el Monte Pinatubo en Filipinas hizo erupción lo que provocó que la tierra se enfriara por algunos años. La erupción libero grandes cantidades de aerosoles a la capa más alta de la atmosfera, la cual “bloquea” la luz del sol y redujo la cantidad de energía que llegaba hasta la superficie de la tierra. Para calcular la diferencia entre la cantidad de energía que la Tierra refleja hacia el espacio y la energía que recibe del sol se emplea la variable llamada el *forzamiento radiativo*, como una medida de los cambios que pudiera sufrir el balance de la energía de la Tierra y como esta anomalía podría contribuir al cambio climático. La figura 4 presenta los valores de forzamiento radiativo a nivel global estimados desde 1750 hasta 2005. Los valores del forzamiento radiativo



para GEI como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) aparecen en rojo por tener valores positivos de forzamiento radiativo, lo que significa que contribuyen al calentamiento del planeta. Sin embargo, podemos apreciar que existen barras en azul, porque tienen valores negativos de forzamiento radiativo, lo cual significa que contribuyen al enfriamiento del planeta. Estas barras en azul corresponden al total de aerosoles de origen humano presentes en la atmosfera. Ahora, notemos que cada una de estas barras de color rojo o azul, tiene unas pequeñas líneas horizontales, estas corresponden al error o incertidumbre. Por ejemplo, para el caso del CO₂, se tiene un valor positivo de forzamiento radiativo de 1.6 W m⁻² y unas barras de error de tamaño 0.4W m⁻². Pero en el caso de los aerosoles, en azul, las barras de error o incertidumbre son más grandes que la medición misma. Esto significa que no hay tanta certeza en el valor del forzamiento radiativo para el caso de los aerosoles. Esto se debe a que las partículas de aerosoles, tienen una variación muy amplia de sus tamaños, que los tiempos de vida en la atmosfera varían de minutos hasta meses, y que además de ser emitidos por diversas fuentes, pueden generarse a partir de elementos que estén en la atmosfera. El que el parámetro de forzamiento radiativo tenga mucha incertidumbre, provoca que los modelos del clima, para pronosticar por ejemplo la temperatura promedio del planeta en 2025, también tengan incertidumbre.

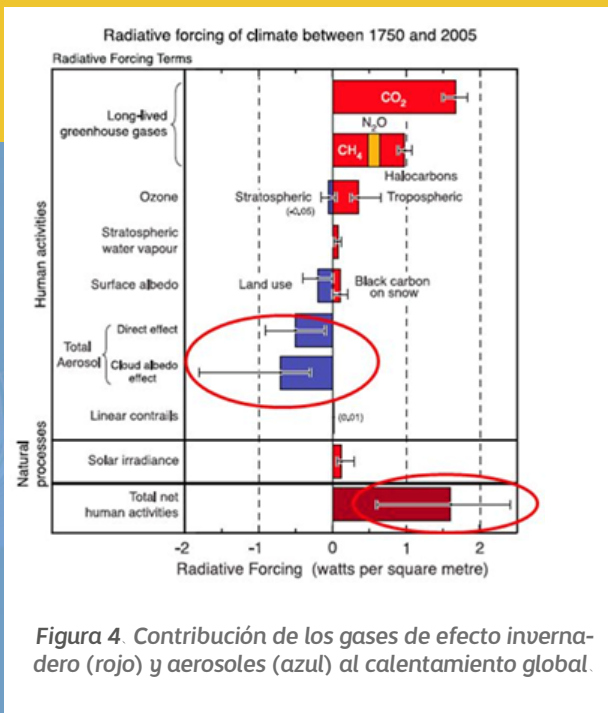


Figura 4. Contribución de los gases de efecto invernadero (rojo) y aerosoles (azul) al calentamiento global.

En conclusión, los tiempos de residencia de los aerosoles en la atmósfera, que van de días hasta meses, así como las diversas formas y tamaños que las partículas tienen, las diversas fuentes tanto naturales como antropogénicas que los emiten, pero también los mecanismos fisicoquímicos por los cuales se forman hacen que la investigación sobre el tema de los aerosoles sea un tema que hoy en día presenta un reto para los investigadores en todo el mundo. De hecho, la mejora de los modelos de pronóstico global de la temperatura del planeta depende de mejorar el conocimiento acerca de los aerosoles, reduciendo la incertidumbre, o falta de certeza en varios aspectos sobre los aerosoles. Por esta razón creemos que es necesario aumentar el número de investigaciones acerca de este tema.

Referencias

Andreae, M. O., & Crutzen, P. J. (1997). Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, 276(5315), 1052–1058. <https://doi.org/10.1126/scien-ce.276.5315.1052>

Haywood, J. (2016). Atmospheric Aerosols and Their Role in Climate Change. In *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth: Second Edition* (pp. 449–463). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63524-2.00027-0>

Jia, G. (2014). Atmospheric Residence Times of the Fine-aerosol in the Region of South Italy Estimated from the Activity Concentration Ratios of $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ in Air Particulates. *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 5(6), 1–9. <https://doi.org/10.4172/2155-9872.1000216>

Mora-Ramírez, M.A., Jenaro Matamoros Reyes, and Luis Alberto Rendón Delgado. 2023. "Aerosoles Atmosféricos. Relevancia En El Clima Del Planeta y Un Experimento Demostrativo Sobre Su Formación En La Interfaz Urbano-Forestal." *RD-ICUAP Año 9* (26): 11–19. <https://doi.org/ISSN 2448-5829>

Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science (New York, N.Y.)*, 294(5549), 2119–2124. <https://doi.org/10.1126/scien-ce.1064034>

Caracterización y calibración

**de dispositivos de
medición de partículas
de aerosoles**

José Antonio Moreno Razo
Fidel Montoya Molina
Ema Bárbara Sánchez Rinza

jamr@xanum.uam.mx

Precisión y exactitud de los SBC

Para garantizar que las mediciones sean “buenas” hay que considerar varios aspectos. Para ello es necesario primero hablar de dos conceptos básicos: precisión y exactitud. En los últimos juegos olímpicos, se realizó un evento deportivo donde México obtuvo un excelente desempeño, justo detrás de los equipos coreano y chino, nos referimos al tiro con arco. Pensando en este deporte, podríamos decir que un tirador del equipo coreano es preciso porque todos sus tiros son muy cercanos entre sí, pero al mismo tiempo también es exacto porque atinan cerca del valor deseado, en el centro de la diana. Las mediciones de las partículas (PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$) con los SBC también tienen precisión y exactitud. Para evaluar la precisión de los SBC, se colocan 10 sensores en el mismo sitio y se evalúan las diferencias entre las mediciones entre ellos, como se muestra en la figura 1(a). Al mismo tiempo, para evaluar la exactitud de las mediciones de los SBC, estas se comparan con las mediciones de un equipo calibrado que posee mayor precisión y exactitud (EPAM5000) como se muestra en la figura 1(b). La precisión y exactitud de las mediciones de los SBC varían dependiendo de la marca.

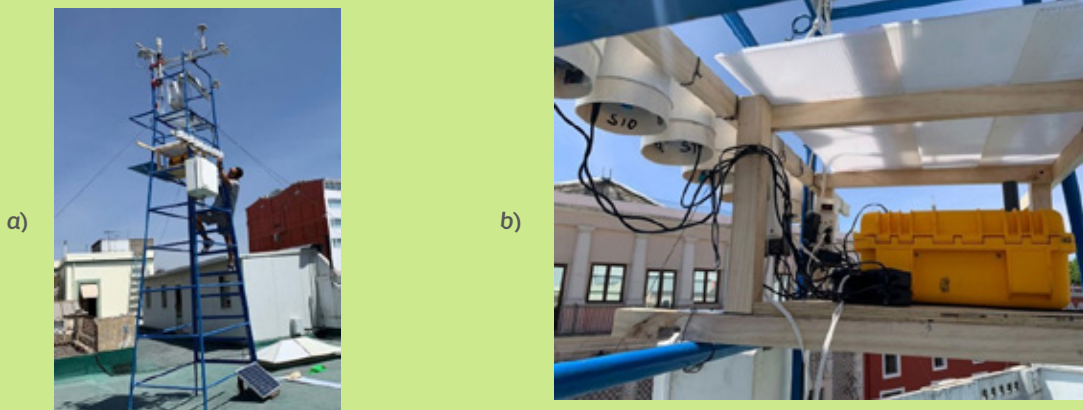


Figura 1. (a) Colocación de varios SBC en una torre junto (b) a un instrumento de referencia en instalaciones del Departamento de Investigaciones Urbanísticas (DIAU) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Es importante comentar que existen estudios recientes que demuestran que la exactitud de los SBC, de una misma marca, varía dependiendo de las condiciones ambientales y cantidad de partículas, en otras palabras, la exactitud de las mediciones de los SBC cambia de lugar en lugar. Este factor es uno de los principales retos a los que se enfrentan las mediciones con este tipo de SBC.

Calibración con técnicas de IA

Las matemáticas y herramientas computacionales permiten mejorar la precisión y exactitud de las mediciones de los SBC. Existen diversas técnicas para realizar esta tarea. Ahora se presentan detalles sobre la calibración de SBC con métodos que han destacado en las últimas décadas, denominados en conjunto como inteligencia artificial (IA).

Para calibrar los sensores empleando la IA es necesario realizar análisis y tareas sobre los datos: (1) remover datos atípicos, (2) ajustar el modelo (3) validación del modelo, (4) obtener predicciones y mejorar (5) la correlación entre las mediciones de los SBC y las correspondientes de referencia (Wu, H., et al, 2022).

El primer paso consiste en remover datos atípicos, como aquellos que por alguna razón se midieron mal, o incluso, donde se presentó un cambio brusco en el ambiente. Son factores externos por lo que los datos recolectados por el SBC pueden verse alterados, resultando en una mala lectura u omisión de alguna variable. Por lo tanto, se hacen uso de herramientas matemáticas para rellenar la información sin afectar el comportamiento de los datos originales restantes.

Una vez que se dispone de una secuencia de datos bien definida, se procede al ajuste de un modelo matemático basado en IA, que reproduzca el comportamiento del clima. Más adelante se describen algunas técnicas para lograr este objetivo. Siguiendo las mejores prácticas descritas en la literatura sobre técnicas de IA, se decide utilizar el 70 % de los datos recolectados tanto por el SBC como por la fuente de referencia para entrenar el modelo, reservando el 30 % restante para su validación. La evaluación del modelo se realiza de dos maneras. Primero, verificamos que la IA sea capaz de replicar los valores utilizados en el ajuste. Segundo, comprobamos su capacidad predictiva aplicándolo a datos que no fueron incluidos en el entrenamiento, cuyos valores reales conocemos, lo que permite evaluar su precisión y generalización.

Técnicas

de calibración

El objetivo de la IA es encontrar ecuaciones matemáticas (las cuales intentan imitar el funcionamiento humano) que puedan reproducir información de cualquier tipo y lograr por ejemplo predicciones certeras de un evento, contestar una pregunta aleatoria, descifrar patrones en una imagen, analizar el comportamiento de animales. Esto se conoce actualmente como “entrenar neuronas artificiales”, es decir entrenar modelos de IA. Para ajustar modelos usando algoritmos de IA se aplican diferentes técnicas; el caso más sencillo es la regresión lineal (de una o varias variables) y uno más complejo es el entrenamiento de un conjunto de neuronas artificiales con diferentes características que relacionan grandes conjuntos de datos obteniendo modelos más precisos y exactos comparados a los que se obtienen con una regresión simple.

Las redes neuronales con múltiples capas, o el llamado aprendizaje profundo (“deep learning” en inglés), es una rama de la IA. Estas son capaces de manejar grandes volúmenes de datos. Ahora bien, en esta parte debe quedar claro que la continuidad temporal es crucial para obtener una calibración y pronósticos fiables. Por lo que, al utilizar redes neuronales para generar modelos de series temporales se puede realizar mediante redes neuronales recurrentes (RNN por sus siglas en inglés). Estas contemplan conexiones entre neuronas que permiten que cada capa de salida retroalimente, como entrada, en el siguiente paso temporal. Esto da el carácter de memoria interna a la red para procesar información. Otro método es la división de series temporales (time split series, en inglés). Lo cual consiste en, transformar una serie temporal en varios subconjuntos de datos, que son entrenados consecutivamente, generando así modelos robustos.

Así como existen diversas técnicas como las que acabamos de describir, otras tantas metodologías

se siguen en conjunto para obtener los modelos que describan mejor las variables climatológicas. Un ejemplo de ellas es la validación cruzada, que consta de encontrar dentro de todos los modelos posibles, que se pueden obtener al entrenar una red neuronal, aquel que genere una mínima diferencia entre los datos originales a los calculados por la computadora. Otra técnica que tiene también diferentes variaciones es el frente de Pareto, que es una técnica con dos objetivos: 1) encontrar un modelo que minimiza las diferencias entre datos y 2) que sea sencillo matemáticamente, lo que es en otras palabras, que las ecuaciones que describen el comportamiento contengan pocos términos.

Pero todos los procesos de inteligencia artificial requieren de herramientas matemáticas que pueden ser triviales, o no, pero lo que sí es seguro es que los costos computacionales también tienen efecto en la obtención de buenos resultados. Así como se requiere cierto tiempo para entrenar una sola neurona, el entrenar una red neuronal que contenga varias capas y muchas neuronas puede ser una larga espera para obtener un resultado. Una solución al problema computacional, del tiempo gastado en entrenar una red de neuronas, es el computo en paralelo usando las tarjetas gráficas (GPU) de un ordenador, lo cual destaca por la capacidad de ejecutar varios procesos a la vez y optimiza el uso de la memoria RAM de una computadora, esto resulta en un ahorro de tiempo impresionante, ya que tareas que se ejecutaban, por ejemplo, en 24 horas, pueden hacerse en media hora o incluso menos.

3.1 Regresión lineal múltiple y redes neuronales

Para describir el comportamiento entre una variable y otras se utiliza la regresión lineal, donde si una variable presenta un cambio, otra también lo tendrá; es decir dependen una de la otra. El caso más sencillo es, obtener una ecuación lineal para calibrar el sensor en función de una sola variable, por ejemplo, usando solo los datos de materia particulada $PM_{2.5}$ del SBC, con el objetivo de obtener una medición muy cercana a la del sensor de monitoreo de referencia. Por su facilidad teórica y práctica, este método ha sido aplicado en diversos estudios no necesariamente en el rubro de datos atmosféricos.

Si se incorporan más variables como pueden ser la humedad, la temperatura o algún otro tipo de contaminante, el entrenamiento de los modelos tiende a ser más preciso al estar contemplando más información. En la figura 2 se muestra el modelo de una neurona artificial (función de activación), donde los valores de entrada x_1, x_2, \dots, x_n representan una variable atmosférica como la concentración de algún contaminante ($PM_{10}, PM_{2.5}, PM_{1.0}$), temperatura, etc. Mientras que un valor de salida en nuestro caso es el nivel de material $PM_{2.5}$ o PM_{10} presente en el aire como si hubiese sido medido con un sistema como el EPAM5000.

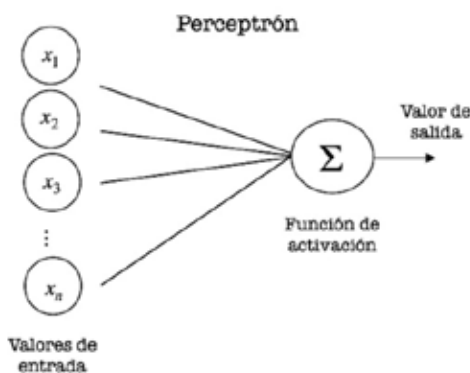


Figura 2. Modelo de una neurona artificial (perceptrón). Donde cada variable de entrada x_1, x_2, \dots, x_n representan una característica atmosférica como la concentración de algún contaminante, temperatura, etc.

Ahora bien, si ya no se utilizan relaciones lineales en las neuronas artificiales y se agregan más capas dentro de una red, se filtran mejor los datos y es posible obtener modelos que cumplan con certeza lo que se busca. En la figura 3 se muestra un ejemplo sencillo de esto, se consideran dos valores de entrada (datos de los SBC) y dos capas ocultas, una con tres neuronas y otra con cuatro neuronas. Cada neurona realiza un tratamiento diferente a los datos y todo lo que se genera llega al valor de salida, en este caso valores de los $PM_{2.5}$ que deben ser iguales o muy cercanos a los de referencia.

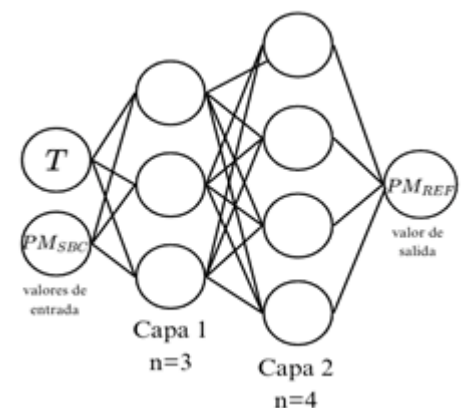


Figura 3. Red neuronal para reproducir y predecir concentraciones de los $PM_{2.5}$ del sistema de referencia usando solo las variables de temperatura y contaminante del SBC.

Usando ambas técnicas descritas brevemente en esta sección se han obtenido algunos resultados. Se tienen modelos simples que generan y predicen la variación del material particulado de PM_{2.5} con base en la temperatura, humedad y la concentración del mismo contaminante sin calibrar, usando ya sea regresión simple o redes neuronales. En la figura 4 se muestra la serie temporal de datos obtenidos por los modelos de IA, los cuales siguen el comportamiento de la información de referencia ya sea en el 70 ϕ del entrenamiento y el 30 ϕ de validación. Se continúa trabajando y recopilando más información en diferentes zonas para lograr una mejor reproducción de datos sin necesidad de tener el aparato de referencia; asimismo encontrar modelos que sean capaces de manejar muchas más variables de entrada, es decir más variables que interfieren en el ambiente y el comportamiento de contaminantes, y que los valores de salida sean igualmente más variables.

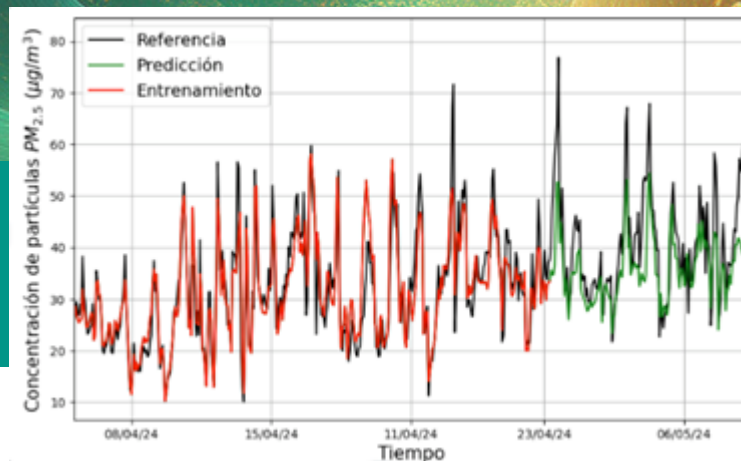


Figura 4. Resultado de aplicar IA para describir y pronosticar el comportamiento de un contaminante ambiental

Por ende, los modelos matemáticos obtenidos con estas metodologías de IA ayudan a calibrar los SBC para que generen datos como si se tratara de un sensor de referencia, los cuales se encuentran en los sistemas de monitoreo federales. Una vez calibrada una red con SBC, ya no es necesario el monitoreo en paralelo con uno de referencia, lo cual es una gran ventaja que abre muchas oportunidades de investigación. Además de la calibración, se puede lograr un pronóstico de condiciones atmosféricas respecto a los contaminantes presentes, así como la ubicación sobre las fuentes de contaminación que más contribuyen en la actualidad. Todo esto tiene impacto en como visualizamos la contaminación en otras zonas del país, generado en las ciudades, y así poder contribuir a una mejor educación ambiental y aportar en la elección de normativas para el cuidado del medio ambiente.

Referencias

Aix, M. L., Schmitz, S., & Bicout, D. J. (2023). Calibration methodology of low-cost sensors for high-quality monitoring of fine particulate matter. *Science of The Total Environment*, 889, 164063.

Wu, H., et al., 2022b. Short-term effects of exposure to ambient PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ on ischemic and hemorrhagic stroke incidence in Shandong Province, China. *Environ. Res.* 212 (Pt C), 113350.

Gomez, I., de Cerio, U. D., Parra, J., Rivas, J. M., & Gutierrez, J. J. (2024). Using GPUs in real-time applications-A review of techniques for analyzing and optimizing the timing parameters. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 21(1), 1-16.

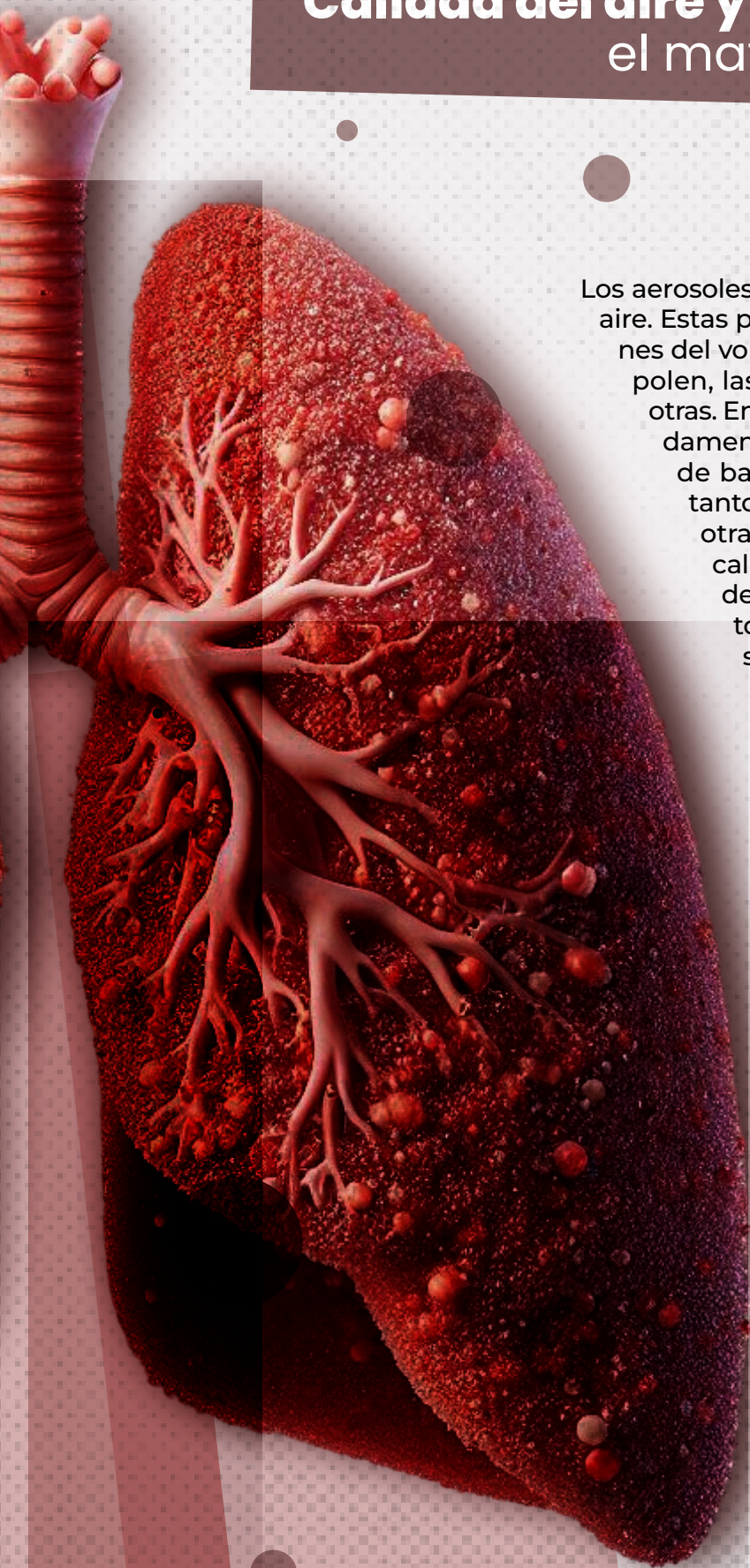
Isasi Viñuela, P., Galván León, I. M. (2004). *Redes de neuronas artificiales: un enfoque práctico*. España: Pearson Educación.

Red Ciudadana de Monitoreo de la Calidad del Aire en Puebla



Marco A. Mora-Ramírez
Carmen Cerón Garnica
Ángel José González Pineda
marco.morar@correo.buap.mx

Calidad del aire y el material particulado



Los aerosoles se definen como partículas suspendidas en el aire. Estas partículas de aerosoles provienen de las emisiones del volcán Popocatepetl, el humo de los incendios, el polen, las esporas de hongos flotando en el aire, entre otras. En su conjunto, los aerosoles juegan un papel fundamental en la formación de nubes y en los procesos de balance de radiación del planeta tierra y, por lo tanto, en el tema del calentamiento global. Pero, por otra parte, los aerosoles, ocasionan deterioro en la calidad del aire, lo que desencadena alergias, esto debido al proceso inflamatorio del sistema respiratorio, ver Capítulo “La calidad del aire en Puebla y su impacto en pacientes con asma alérgica”. Asimismo, a la mala calidad del aire se le atribuyen alrededor de 7 millones de muertes prematuras en el mundo. Pero, al mismo tiempo, las partículas de aerosoles al ser inhaladas contribuyen a modificar los procesos bioquímicos al interior del organismo humano y propician obesidad, ver Capítulo “La conexión silenciosa entre la contaminación del aire por partículas de aerosoles y la obesidad en Puebla”. También, como se explica en el Capítulo “La relación entre la contaminación del aire y la salud de las plantas: Retos y soluciones”, las partículas al depositarse en las hojas de algunas plantas pueden modificar el proceso de fotosíntesis. Aunado a esto, la calidad del aire en la muchas de las ciudades del mundo continua siendo un problema de salud debido al aumento de las emisiones de contaminantes, o los incendios que generan cantidades significativas de partículas.

En fin, hemos enlistado una serie de hechos importantes relacionados con la abundancia de las partículas suspendidas en el aire, la salud pública, el crecimiento poblacional y los ecosistemas. Pero ¿Cómo se garantiza el cumplimiento de estas normas? ¿Cómo pueden las personas evitar la contaminación por partículas? Para ello es fundamental realizar mediciones sistemáticas de las partículas en el aire ambiente.

La organización mundial de la salud establece límites de exposición a partículas de aerosoles, ya que, el 99% de la población en el mundo respira aire que no es libre de contaminantes. Para atacar esta crisis por la contaminación del aire, los gobiernos deben realizar una serie de acciones encaminadas a conocer la abundancia de estas partículas en el aire e implementar programas para mejorar la calidad del aire. En este contexto, el gobierno de México establece normas para garantizar los límites de concentraciones ambientales de estos contaminantes para prevenir problemas de salud.

¿Cómo se mide el material particulado?

Para conocer la cantidad de contaminantes atmosféricos se pueden realizar mediciones del aire ambiente mediante sensores, o bien, de manera indirecta a través de datos satelitales. Así mismo, también pueden emplearse modelos computacionales para realizar simulaciones de los procesos físicos y químicos, y así, estimar la cantidad de contaminantes en alguna región. Los equipos para medir la cantidad de las partículas de aerosoles, denominados de nivel regulatorio o científico, son la punta de lanza en cuanto la tecnología para la medición de las concentraciones de las partículas de los aerosoles. Varios de estos equipos, se basan en el método de conteo de partículas mediante sus propiedades ópticas, y el principio físico de medición consiste en la dispersión de la luz. Estos equipos de nivel regulatorio aspiran una muestra de aire, a través de un tubo cuya altura se recomienda debe estar por arriba del nivel del dosel urbano, es decir unos metros por encima del promedio de la mayoría de las casas de la zona, y después la muestra de aire ingresa a una cámara de medición donde las partículas se iluminan con un láser de cierta energía ($\lambda = 655 \text{ nm}$), el láser incide en el flujo de aire de manera per-

pendicular y la luz del láser es dispersada por cada partícula. Mediante un sistema óptico de espejos la luz dispersada llega a un sensor o detector (fotodiodo). La intensidad del haz de luz que recibe el detector es proporcional al tamaño de la partícula. El número de conteos por unidad de tiempo depende del número de partículas y del caudal volumétrico. A través de algunos algoritmos integrados en un software de los equipos de nivel regulatorio es que se puede obtener la cantidad de material particulado en diferentes tamaños (PM10, PM2.5 y PM1.0).

En el caso de la Ciudad de Puebla, se cuenta con la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) que mide diversos contaminantes, incluyendo partículas de aerosoles: finas (PM2.5) y gruesas (PM10). Cuenta con ocho sitios de monitoreo, en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla, que se conforma por los municipios de Amozoc, Coronango, Cuautlancingo, Puebla, San Andrés Cholula y San Pedro Cholula. Además de los municipios de Atlixco, San Martín Texmelucan y Tehuacán. La Figura 1 muestra un mapa de la ubicación de las estaciones de monitoreo de la REMA.

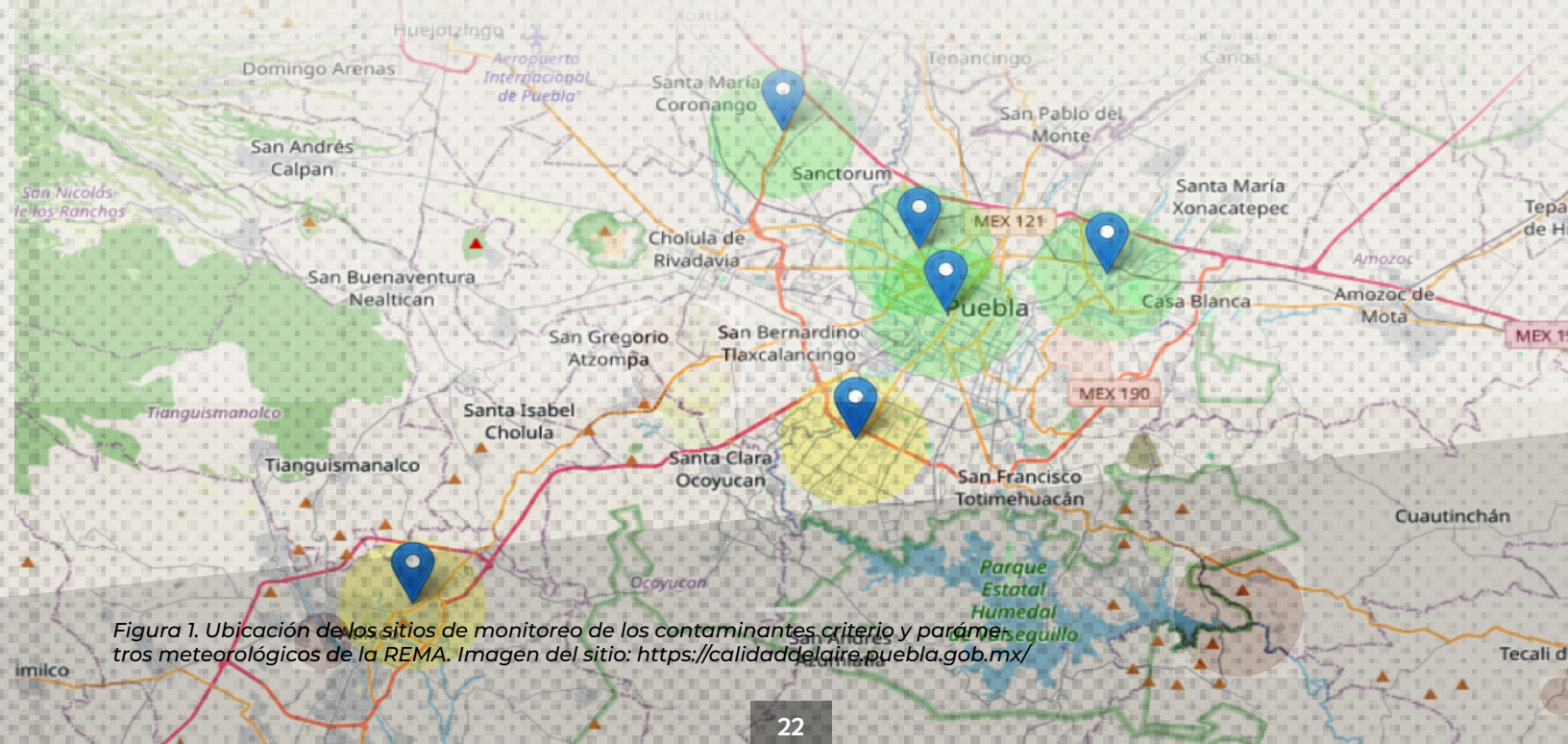


Figura 1. Ubicación de los sitios de monitoreo de los contaminantes criterio y parámetros meteorológicos de la REMA. Imagen del sitio: <https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/>

¿Qué estamos haciendo en la BUAP para medir la calidad del aire?

En el grupo de investigación interdisciplinario, conformado por investigadores de la Facultades de Ciencias Químicas, Ciencias de la Computación, Fisicomatemáticas, el Instituto de Ciencias, así como de estudiantes de licenciatura y posgrado de la BUAP, junto con colaboradores del Instituto de Ciencias de la Atmosfera (UNAM), el Instituto Politécnico Nacional, y el departamento de Física de la UAM, hemos desarrollado dispositivos de bajo costo, que en una integración permitan medir las concentraciones de partículas en la atmosfera y que con la instalación de estos dispositivos en las azoteas de casas de familias poblanas, se pueda crear una Red Ciudadana de Monitoreo de la Calidad del Aire. Esto permitirá generar datos de los niveles de concentración de partículas en aerosoles que, evidentemente, beneficiarán a miles de familias poblanas. Los sensores de bajo costo que adquirimos utilizan el mismo principio de funcionamiento que los que emplean los equipos de nivel regulatorio, pero al ser una tecnología emergente esta debe ser primero probada bajo diferentes escenarios, para garantizar la mejor calidad posible de los datos, y también para conocer sus limitaciones (Seesaard et al., 2024). En el artículo “Caracterización y calibración de dispositivos de medición de partículas de aerosoles” de este mismo número, se comentan más detalles al respecto. La Figura 2, muestra una propuesta de la ubicación de los dispositivos de medición de partículas que juntos conforman la Red Ciudadana de Monitoreo de la Calidad del Aire.

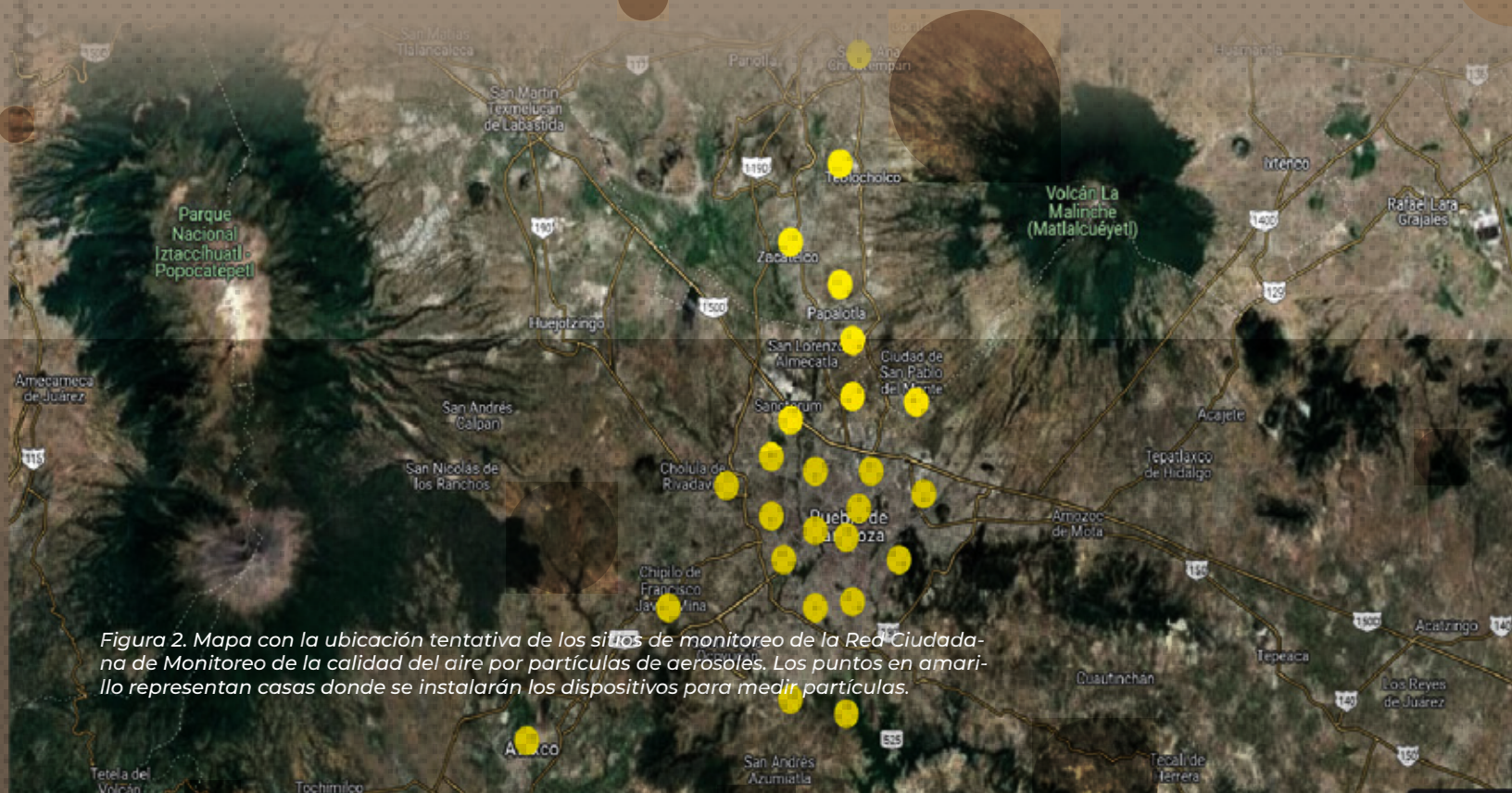



Figura 2. Mapa con la ubicación tentativa de los sitios de monitoreo de la Red Ciudadana de Monitoreo de la calidad del aire por partículas de aerosoles. Los puntos en amarillo representan casas donde se instalarán los dispositivos para medir partículas.



La distribución espacial tentativa de los sitios de monitoreo, que se muestran en la Figura 2, abarca la zona metropolitana de la Ciudad de Puebla, y se pretende que también incluya una parte del estado de Tlaxcala, donde se forma un corredor de vientos que soplan desde Apizaco (al norte), pasando por Santana Chiautempan, y Zacatelco, hasta llegar a la zona norte y noroeste de la Ciudad de Puebla. Dicho sea de paso, esta región se denomina cuenca atmosférica. De tal forma, que el estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos como los aerosoles de partículas, a través de la cuenca del corredor Puebla-Tlaxcala, serán posibles a partir de los datos que genere la Red Ciudadana de Monitoreo de partículas de aerosoles. La ubicación de cada uno de los sitios de monitoreo se realiza de forma estratégica, y siguiendo las guías internacionales (Cavender, 2007).

Ahora bien, para hacer posible que los dispositivos instalados en las azoteas de las casas envíen los datos, se requiere conectar a los dispositivos a la red inalámbrica (wifi) de los hogares, los dispositivos entonces envían los datos a la nube hasta que la información llegue a un sitio llamado “servidor”. Este proceso se denomina el internet de las cosas, y comúnmente se puede encontrar como “IoT”, por sus siglas en inglés. Ahora, el envío de los datos, hasta que esa información es desplegada en tiempo real para un usuario en su computadora o teléfono inteligente, se realiza mediante un protocolo específico (MQTT) que tiene básicamente tres elementos, a saber, un Publicador (Publisher) que envía mensajes, en este caso es el dispositivo que envía mensajes de datos. Un Suscriptor (Subscriber), quién recibe los mensajes de datos. Finalmente un “Broker”, que actúa como intermediario, recibiendo los mensajes del publicador y los reenvía a los suscriptores. Después de que se envían los datos y se encuentran en un servidor, existen herramientas computacionales dentro del servidor que permiten desplegar los datos, prácticamente en tiempo real. Pero también dentro del servidor, los datos pueden ser analizados y procesados para desplegar información adicional, de acuerdo con solicitudes específicas de los usuarios (Figura 3).

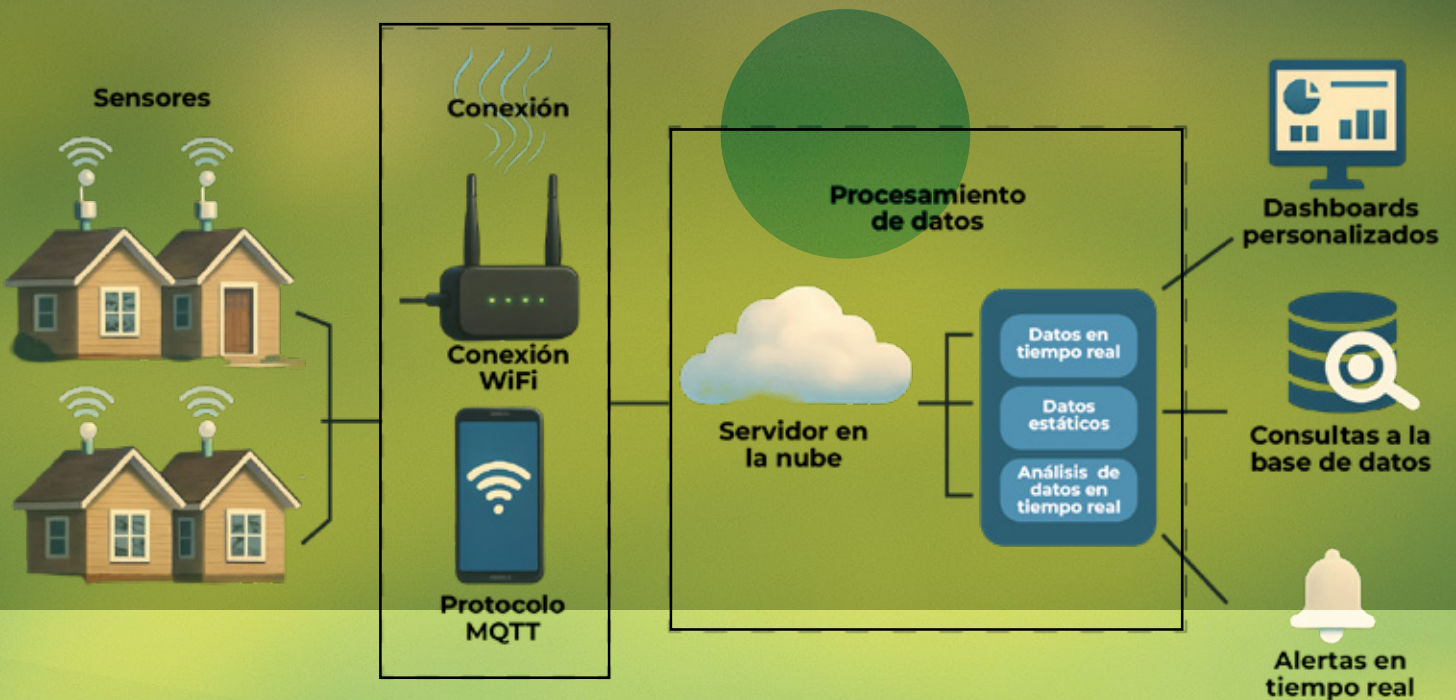


Figura 3. Estructura de comunicación de datos de la Red Ciudadana de Monitoreo de calidad del aire por partículas de aerosoles.

Reflexión sobre e propósito de una red de

la Red Ciudadana de Monitoreo de calidad del aire

Antes de terminar queremos hacer énfasis en los beneficios que conlleva una red de monitoreo de la calidad del aire:

- Observar las tendencias en la contaminación en diferentes regiones de la Ciudad de Puebla.
- Estudiar el transporte de contaminantes entre cuencas atmosféricas, esto significa que podríamos estudiar como las partículas de aerosoles “migran” desde la Ciudad de Puebla hacia otras regiones vecinas, o quizá como la influencia de otras regiones se observa en la calidad del aire de la Ciudad de Puebla.
- Brinda información para correlacionar la calidad del aire con problemas de salud. Por ejemplo, casos de asma con la cantidad de partículas de aerosoles.
- Nos posibilita evaluar estrategias de regulación de contaminantes y validar simulaciones numéricas de los modelos de calidad del aire, dispersión o difusión.
- Proveer datos al público en general de manera sistemática.
- Evaluar con cierta precisión el cumplimiento de las normas.
- Evaluar episodios de emergencia, como es el caso de las emisiones del volcán o incendios de tamaño considerable.

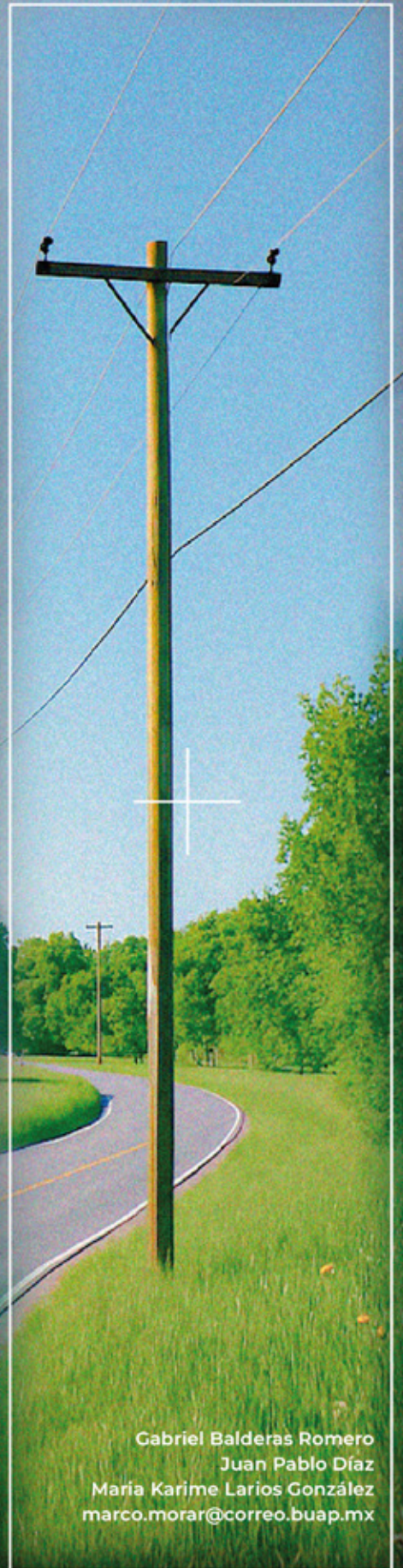


Referencias

Cavender, K. (2007). Ambient air monitoring network assessment Guidance, Analytical Techniques for Technical Assessments of Ambient Air Monitoring Networks.


Keyes, T., Domingo, R., Dynowski, S., Graves, R., Klein, M., Leonard, M., Pilgrim, J., Sanchirico, A., & Trinkaus, K. (2023). Low-cost PM2.5 sensors can help identify driving factors of poor air quality and benefit communities. *Heliyon*, 9(9), e19876. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E19876>

Seesaard, T., Kamjornkittikoon, K., & Wongchoosuk, C. (2024). A comprehensive review on advancements in sensors for air pollution applications. *Science of The Total Environment*, 951, 175696. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.175696>



El efecto de la
humedad y el viento
sobre la cantidad de
partículas de aerosoles
y los modelos de calidad del aire

Gabriel Balderas Romero
Juan Pablo Díaz
María Karime Larios González
marco.morar@correo.buap.mx



Las partículas de aerosoles pueden provenir tanto de fuentes naturales como antropogénicas, y al ser tan pequeñas pueden penetrar en los pulmones y llegar hasta el torrente sanguíneo, causando graves problemas de salud, incluidas enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso contribuyendo a la mortalidad prematura (Shahriyari et al., 2022). Sin embargo, el problema de la contaminación del aire, por partículas, no solo es un problema de salud pública. También tiene consecuencias ambientales importantes, como la reducción de la visibilidad, la degradación de los ecosistemas y el cambio climático (Manjula, 2018). Estos aspectos se enuncian para resaltar la importancia de las partículas en el medio ambiente y la salud pública y en varios de los artículos de este número se abordan estos temas. En este artículo, mostraremos una serie de ejemplos para comprender el impacto de factores meteorológicos como la temperatura, el viento y la humedad sobre la abundancia (concentraciones) y el transporte de partículas de aerosoles. Es importante notar que, la comprensión de la relación entre la meteorología y la abundancia de los aerosoles es de utilidad para desarrollar estrategias efectivas para gestionar la calidad del aire y proteger la salud pública. Pero al mismo tiempo una parte de esta relación que se desconoce con precisión, ayudaría a mejorar los modelos de pronóstico del clima, los cuales son empleados por la comunidad científica para estimar los aumentos en la temperatura global.

La humedad

y las concentraciones de partículas

Muchas ciudades en el mundo tienen niveles de contaminación del aire que están peligrosamente cerca del umbral, recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), para proteger la salud de las personas. La Ciudad de Beijing en China, es una de las ciudades más contaminadas del mundo, y recordemos que cuando fue sede de los juegos olímpicos de invierno en 2022, los chinos se prepararon en diversos aspectos para ser la mejor sede. La mejora de la calidad del aire fue una de sus preocupaciones, de manera que comenzaron a realizar una

serie de acciones para mejorarla. Se estima que las concentraciones de partículas finas (PM2.5) en el ambiente de la Ciudad de Beijing se redujeron en un 25% a pesar de dejar otras variables constantes. Entre muchas de las acciones que emprendieron, hay una que llama especialmente la atención; previo a la realización de los juegos Olímpicos de invierno, comenzaron a realizar recorridos en las calles de la ciudad con un vehículo que durante los recorridos realizaba disparos de agua pulverizada, para con ello, reducir las concentraciones de partículas.



Figura 1. Cañón que rocía agua pulverizada para reducir la cantidad de partículas en el aire ambiente de la Ciudad de Beijing en China. Fuente: Daily Mail, 2024.

Las personas acostumbran a rociar agua en el suelo antes comenzar a barrerlo con el fin de evitar que “se levante el polvo”, que dicho sea de paso el término correcto es evitar la resuspensión de partículas. Y es cierto, rociar agua ayuda a prevenir que se resuspendan partículas, al igual que es cierto que el rociar agua al aire en ciudades contaminadas reduce las concentraciones de partículas finas suspendidas en el aire. En otras palabras, la cantidad del agua en el aire (humedad) está relacionada con la abundancia de partículas finas en el aire. En condiciones de mucha humedad en el aire, la mayoría de las partículas finas tienden a presentar un comportamiento higroscópico, es decir, tienen la capacidad de absorber el agua que hay en el aire ambiente, lo que ocasiona un aumento en su tamaño, y al ser más grandes, la probabilidad de caer al suelo, aumenta. Este efecto tiene beneficios en la salud y medio ambiente, ya que, la reducción en la cantidad de partículas suspendidas trae la mejora de la calidad del aire, por consiguiente, beneficia a personas vulnerables, como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias. En cuanto al ambiente, reducir la cantidad de partículas, podría significar que mejora la visibilidad, con cielos más azules.

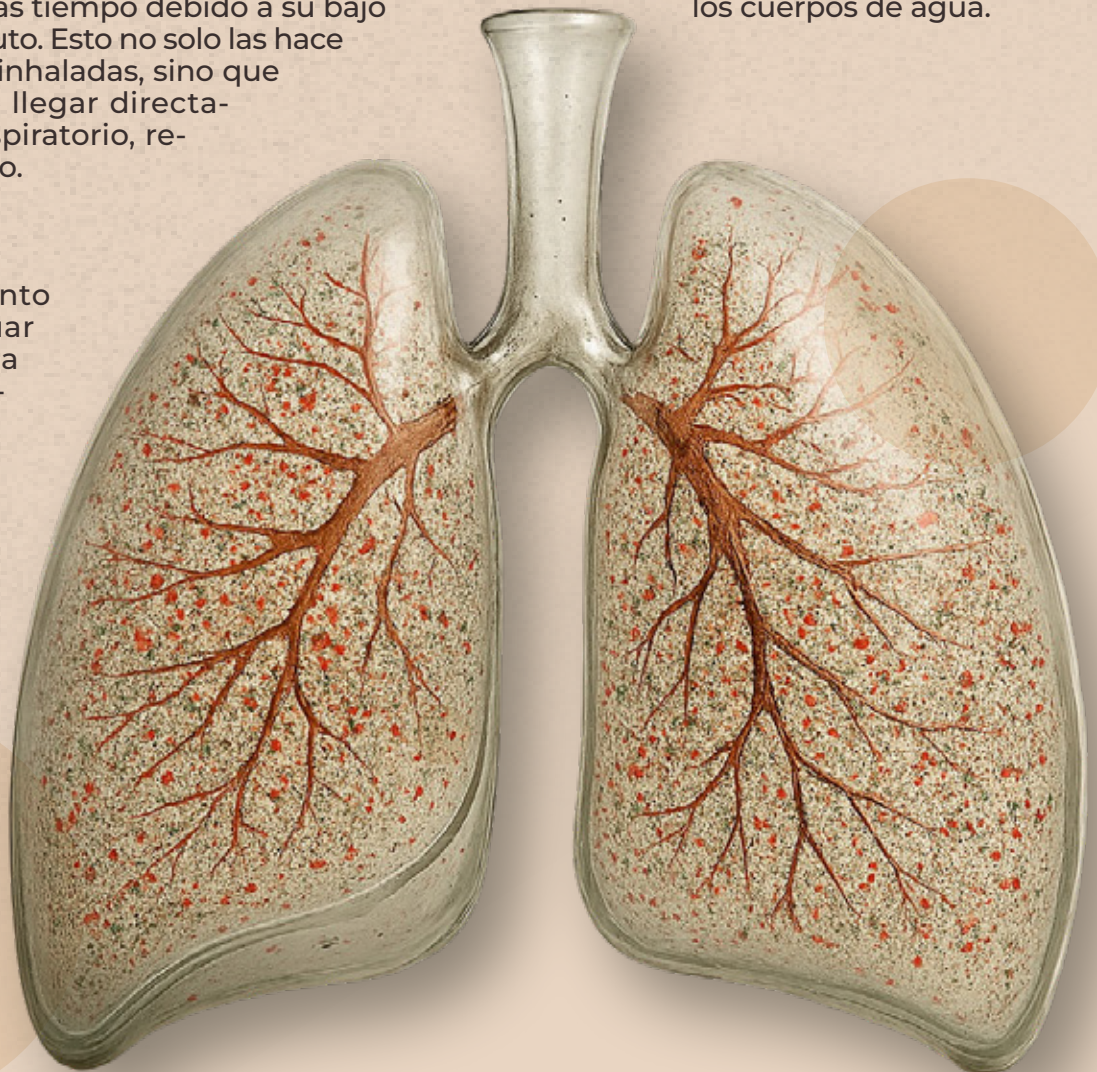
Sin embargo, la humedad puede llegar a afectar tanto en la formación como en la eliminación de las partículas. En el artículo de Yuan et al (2023) se demostró, con ayuda de un experimento, que, a mayor porcentaje de humedad, 65% de humedad relativa y a una temperatura de 40 °C en el ambiente, se promueve el crecimiento higroscópico de las partículas, es decir, se facilita su eliminación en el aire, como ya habíamos comentado para el caso de Beijing. Sin embargo, en condiciones secas y frías, con 25% de humedad relativa y a una temperatura de 20 °C, las partículas finas tienen una menor absorción de agua, lo que favorece que aumenten su estancia en el medio ambiente. Esta situación y otras, es lo que hace sumamente interesante y complejo el estudio de los aerosoles (partículas suspendidas en el aire).

¿El viento ayuda o no a reducir la cantidad de partículas finas?

Otro de los factores meteorológicos clave, que afecta la cantidad de partículas suspendidas en el aire, es la intensidad del viento. Hablemos por ejemplo del aire que respiran los peatones durante la espera del cambio del semáforo, para poder cruzar una calle y supongamos que en ese momento ocurre un viento fuerte (racha), y ocasiona la resuspensión del polvo. Este proceso es notorio en lugares con mucho tráfico o en periodos calurosos, donde el suelo está seco y en general el aire en el ambiente también es aire seco (baja humedad) y las calles polvorientas benefician a la acumulación de material particulado. Es importante recordar que las partículas más pequeñas, como las PM2.5, son susceptibles a permanecer en suspensión por más tiempo debido a su bajo peso y tamaño diminuto. Esto no solo las hace más propensas a ser inhaladas, sino que también les permite llegar directamente al sistema respiratorio, representando un riesgo.

Por otro lado, el viento también puede actuar como un aliado en la dispersión de partículas mejorando, temporalmente, la calidad del aire. Por ejemplo, y sobre todo en época de

lluvias, cuando hay menor cantidad de partículas finas en el aire, respecto a temporadas de secas-calientes (marzo, abril y mayo para el caso del centro de la República Mexicana), el viento ayuda a remover las partículas. Sin embargo, esta ventaja tiene como condición la dirección del viento, ya que dependiendo desde donde provienen las partículas que son transportadas por el viento, puede o no agravar problemas de contaminación, esto también viene acompañado de diversas condiciones geográficas como las montañas, los valles, o los cuerpos de agua.



Veamos otro ejemplo sobre la influencia del viento sobre la abundancia de partículas en el aire ambiente. El volcán Popocatepetl es un volcán activo, que en ciertos días se convierte en una fuente importante de emisiones de azufre y de partículas de aerosoles. Pero de todos esos días donde tiene actividad, solo algunos de ellos impactan en la calidad del aire de la Ciudad de Puebla. Esto se debe a que el transporte de las emisiones de ceniza (partículas) desde el cráter del volcán hasta que se depositan en el suelo, depende de las condiciones meteorológicas, especialmente de la dirección del viento.

Algunos estudios, como Juárez (2004), han expuesto las consecuencias de las emisiones del volcán sobre la calidad del aire en Puebla, específicamente en cuanto a las partículas y gases como el dióxido de azufre (SO₂). Este último se encuentra relacionado con problemas hacia la salud humana, y también es consecuente de la lluvia ácida, la cual daña a los ecosistemas acidificando cuerpos de agua y a su vez, afecta la vegetación. Se ha documentado que las concentraciones de partículas, registradas por los sitios de monitoreo de la red del gobierno de Puebla, superan la Norma Oficial Mexicana (NOM) durante algunos periodos de invierno a causa de la actividad del volcán. El factor del viento juega un papel crucial en este tipo de eventos, ya que diversas investigaciones aseguraron que las fechas cuando se observó un incremento en los índices de contaminación coincidió con vientos soplando en dirección de la ciudad de Puebla, transportando la ceniza y los gases del volcán Popocatepetl. Además, esto coincide con las bajas temperaturas que tienden a generar una inversión térmica, y hacer más estable o duradera la abundancia de partículas en el aire, dificultando que los contaminantes se dispersen o depositen.

Figura 2. Emisiones y calidad del aire comprometidas por la caída de ceniza volcánica del volcán Popocatepetl. Fuente: página oficial del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Los modelos de calidad del aire

Recapitulando, el caso de la contaminación por partículas en la Ciudad de Beijing China, se aborda con una solución a nivel local. Es decir, solo en ciertos puntos (localmente) se rocía agua para reducir las concentraciones de partículas. En cambio, el problema de las emisiones del volcán Popocatepetl es un problema a nivel regional, como mencionamos el impacto de las emisiones del volcán Popocatepetl depende de las condiciones meteorológicas, especialmente de la dirección e intensidad del viento. Esto nos plantea la pregunta de si las concentraciones de partículas que pudiéramos registrar en algún día específico se generan localmente, o provienen en realidad de fuentes de otras regiones. Para poder investigar esto, es necesario estudiar el transporte de contaminantes que ocurren en las denominadas cuencas atmosféricas. Para ello, en principio, se requieren tener varios sitios de monitoreo, no solo en cada uno de los centros urbanos de una cuenca atmosférica, sino también en toda la región incluyendo las áreas urbanas y rurales. Esto no siempre es posible, debido a la extensión del territorio, el número de sitios de monitoreo que se requieren y los costos de instalación y mantenimiento de los equipos de




monitoreo. Para remediar este problema, es posible utilizar los denominados modelos de calidad del aire. El modelo Weather Research and Forecasting Model (WRF) es una herramienta que permite calcular el campo de viento y con ello tener información sobre el transporte de los contaminantes. Los modelos de calidad del aire, son empleados para determinar la evolución temporal a nivel regional de la abundancia de las partículas (PM2.5 y PM10) y algunos gases. Para tener confianza en los datos que arrojan los modelos de calidad del aire, como el WRF, se deben comparar los resultados con los datos de redes de monitoreo. El modelo WRF puede ser utilizado para estimar el transporte de contaminantes entre la CDMX y Puebla, o entre Puebla y Tlaxcala, etc. En este sentido, el año pasado, el grupo interdisciplinario de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla - BUAP, encabezado por el Dr. Marco Mora-Ramírez (Facultad de Ciencias Químicas) y el Dr. Jenaro Reyes Matamoros (Instituto de Ciencias), organizaron un Curso-Taller "Introducción a conceptos y modelos aplicados a

meteorología, el tiempo y la calidad del aire" sobre elementos básicos de meteorología, modelos de calidad del aire (WRF-Chem) e inteligencia artificial que se alojó en las instalaciones del Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas (DIAU) de la BUAP, y en él participaron varias instituciones: Universidad Autónoma Metropolitana (Iztapalapa), la Universidad Veracruzana, la Universidad Nacional Autónoma de México. Los temas del curso-taller son elementos esenciales para poder determinar el transporte de contaminantes en la región de la Megalópolis Central de México. Este es un evento abierto al público, dirigido a aquellos que tienen poca, o ninguna, experiencia con el modelo WRF, ya que se centró en los primeros pasos para instalar y ejecutar el WRF. La siguiente edición de este curso-taller se realizará en el mes de septiembre de 2025, y tiene por objetivo motivar la formación de nuevos investigadores en el áreas de meteorología, modelización de calidad del aire, entre otras áreas asociadas con la atmosfera.



Figura 3. Fotografía de instructores y participantes del Curso-Taller "Introducción a conceptos y modelos aplicados a meteorología, el tiempo y la calidad del aire". De izquierda a derecha tenemos: (a) M. I. S. Juan Pablo Báez Vásquez (DIAU), (b) Dr. Jenaro Reyes Matamoros (ICUAP-BUAP), (c) M. en C. Fidel Montoya (UAM-I), (d) Dr. José Antonio Moreno Razo (UAM-I), (e) Dr. Marco A. Mora-Ramírez (FCQ-BUAP), (f) Mtro. Gabriel Balderas Romero (DIAU-BUAP), y algunos de los estudiantes de licenciaturas y posgrados de la BUAP.

A large, leafy green tree stands in the center of a field. The foreground is filled with numerous white daisies with yellow centers, interspersed with green grass. The background shows a line of trees under a clear blue sky. The overall scene is bright and natural.

En conclusión, la calidad del aire es un tema que nos compete a todas las personas, ya que tiene efectos sobre nuestra salud y bienestar, y además impacta los ecosistemas. Los conceptos de meteorología, y la relación que guardan estos con la abundancia de las partículas es esencial para mejorar la comprensión del tema de la contaminación del aire. Así, mismo el uso de herramientas computacionales, como los modelos de calidad del aire (WRF-chem) son herramientas necesarias para complementar la investigación del transporte de los contaminantes a nivel regional. Por esta razón, es tan importante divulgar y realizar cursos y talleres de capacitación. Es fundamental que las políticas públicas y comunidades se involucren en la creación de sistemas de monitoreo más eficientes, que sean robustas en el sentido de emplear modelos de calidad del aire, y tecnologías emergentes, como el caso de los dispositivos de bajos costo, para reducir los impactos de la contaminación pública y crear un ambiente más saludable para todos.

Referencias

Shahriyari, H. A., Nikmanesh, Y., Jalali, S., Tahery, N., Zhiani Fard, A., Hatamzadeh, N., ... Mohammadi, M. J. (2021). Air pollution and human health risks: mechanisms and clinical manifestations of cardiovascular and respiratory diseases. *Toxin Reviews*, 41(2), 606–617. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.1887261>

Manjula, Preethi Mohan Ph.D. (2018) "Economics And Air Pollution- An Analysis Of Chennai City," *International Review of Business and Economics: Vol. 1: Iss. 3*, Article 17.

Juárez Núñez, A., Gay García, C., & Flores, Y. (2005). Impact of the Popocatepetl's volcanic activity on the air quality of Puebla City, México. *Atmósfera*, ISSN 0187-6236, ISSN-e 2395-8812, Vol. 18, No. 1 (ENE), 2005, Págs. 57-69, 18(1), 57–69. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4505962>

Yuan Y, Li S, Chen T, Ren J. (2023). Effects of Ambient Temperature and Humidity on Natural Deposition Characteristics of Airborne Biomass Particles. *Int J Environ Res Public Health*. 19;20(3):1890. doi: 10.3390/ijerph20031890. PMID: 36767257; PMCID: PMC9914974.

¿Estamos respirando, comiendo y bebiendo

microplásticos?

María Patricia Amador Ramírez
Maribel Arroyo Carranza
Roberto Zúñiga Mora
maria.amador@correo.buap.mx





Indudablemente los materiales plásticos o polímeros sintéticos han contribuido al desarrollo de las sociedades, sustituyendo muchos materiales metálicos, cerámicos o de origen natural, y ciertamente son indispensables en la actividad humana como la concebimos hoy en día. En 2019, se fabricaron 460 millones de toneladas de productos plásticos, de los cuales únicamente el 9% se recicla, y además se estima que en 2026 se producirán alrededor de 1,200 millones de toneladas (OECD, 2022). Esta alta producción en combinación con una baja tasa de reciclado provoca que una gran cantidad de plásticos ingresen en el medio ambiente. En la Figura 1, se muestra una fotografía del río Atoyac, en la ciudad de Puebla, Puebla, donde se puede ver que una buena parte de la basura son desechos de plástico.



Figura 1. Fotografía del río Atoyac en el municipio de Puebla.

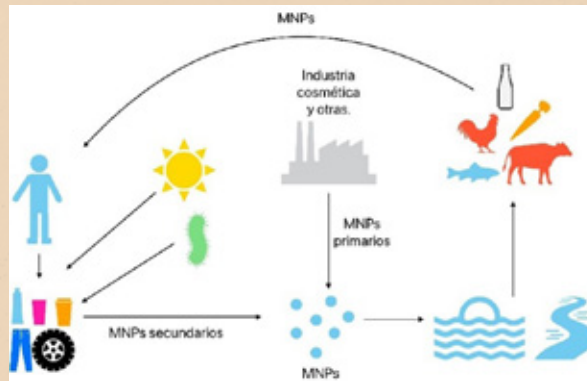
El tema del impacto de los plásticos en el ambiente comenzó a tener auge a nivel global a finales de los años sesenta, a partir de noticias sobre la interferencia física del plástico con los animales en lugares re-

motos del planeta; como cuando los animales quedaban atrapados en redes, comían plástico y se ahogaban, o al comer plástico se “sacaban” pero morían de hambre. Más adelante, se descubrieron materiales plásticos dentro del aparato digestivo de los animales. En fin, existe una larga e interesante historia sobre el tema de los plásticos, el ambiente y su impacto en la salud de los seres vivos (Schmid, 2021). Sin embargo, lo que atrae nuestra atención en este artículo, es que los plásticos al triturarse, desgastarse durante su uso, o partirse, generan pequeños fragmentos o partículas. En 2004 se acuñó el término microplásticos para referirse a estas partículas, con tamaños menores a 0.5 mm, pero hay otras que comentaremos más adelante.



Origen de los micro y nano-plásticos

La contaminación por plásticos es evidente a través de las fotografías que circulan de las islas de plásticos que se forman en los océanos y por lo que cotidianamente podemos observar en las calles, basureros y prácticamente en todos los lugares. Sin embargo, eso no es lo más preocupante, sus efectos se agravan porque por acción de la radiación UV-VIS, por procesos de oxidación o por acción bacteriana, los diferentes tipos de macroplásticos (envases, ropa sintética, bolsas, desechables, llantas, entre otros) se pueden degradar continuamente para producir partículas muy pequeñas como fragmentos de plástico sólido, microfibras de tela o cuerda, o partículas provenientes del desgaste de los neumáticos, entre otros. En general, a las partículas que tienen dimensiones menores a 5 mm y hasta 1mm se les denomina microplásticos, más pequeñas de tamaños nanométricos (10⁻⁹ m), se les denomina nanoplasticos, (a ambas las nombraremos como MNPs, donde estas siglas abarcan los micro y nanoplasticos). Estos MNPs pueden tener dos orígenes, uno primario, el cual incluye a esos MNPs que fueron incorporados de ese tamaño en la elaboración de diversos artículos, como son productos cosméticos o de limpieza; y uno secundario, haciendo referencia a esos MNPs provienen de la degradación de macroplásticos. En la Figura 2, se muestra un esquema de la formación de los MNPs hasta que llegan a nuestro organismo.



Los MNPs más comunes provienen de fibras plásticas originadas por la descomposición de fibras textiles (ropa) como poliésteres, o de envases plásticos como son polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PE), polietilentereftalato (PET) y cloruro de polivinilo (PVC).

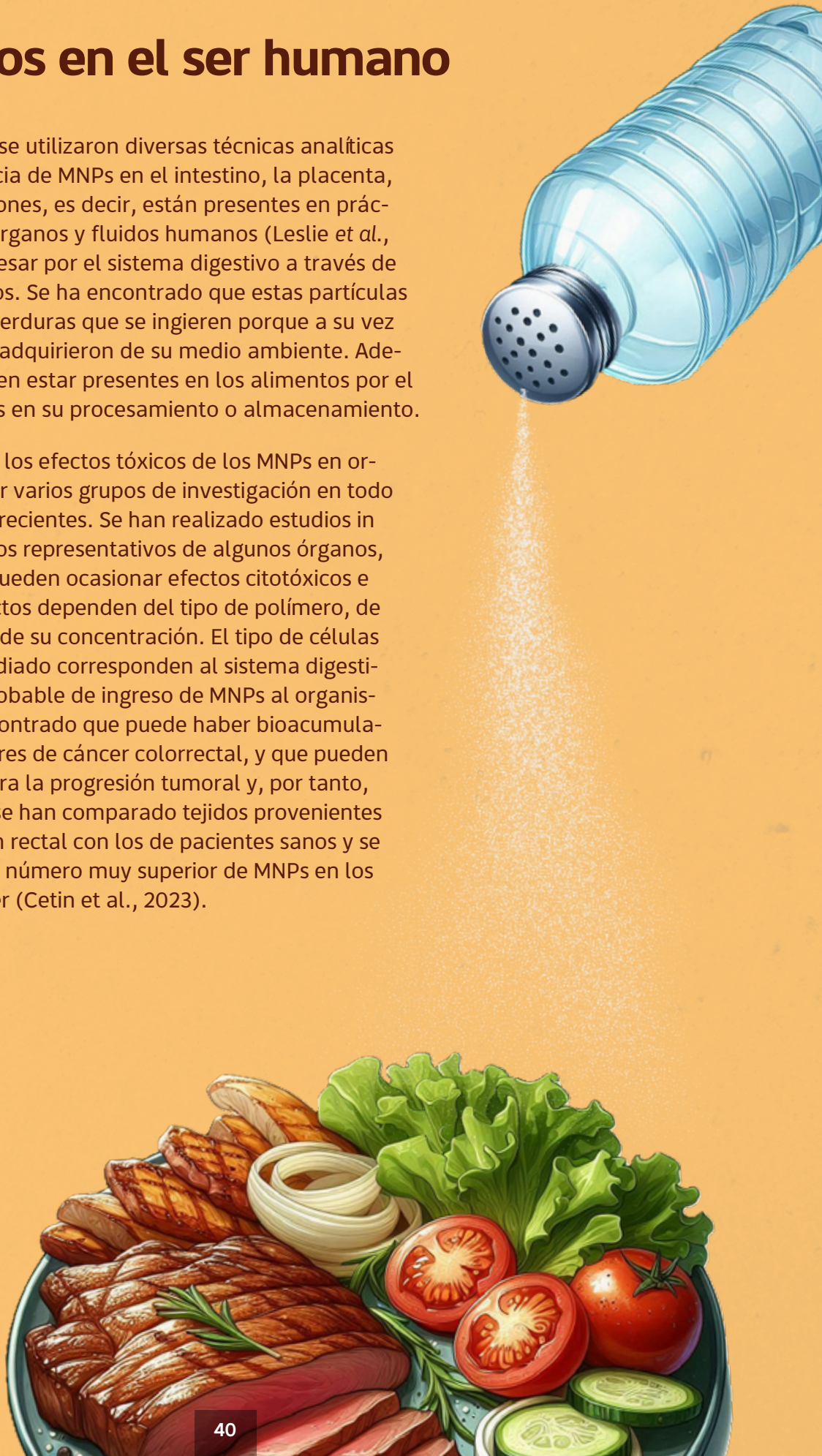
En general, los MNPs pueden ingresar a los organismos vivos a través de la piel, por inhalación o por ingestión y entre más pequeñas sean las dimensiones de los MNPs, su efecto nocivo en el medio ambiente y en particular, en los organismos vivos, incluyendo el ser humano, puede ser mayor. Esto debido a que, entre más diminutas sean, aumenta la posibilidad de traspasar membranas biológicas, como es el caso de la barrera hematoencefálica (Kopatz et al., 2023).

Efectos tóxicos en el ser humano

Estudios recientes en los que se utilizaron diversas técnicas analíticas mostraron que hay la presencia de MNPs en el intestino, la placenta, sangre, leche materna, pulmones, es decir, están presentes en prácticamente todos los tejidos, órganos y fluidos humanos (Leslie *et al.*, 2022). Los MNPs pueden ingresar por el sistema digestivo a través de los alimentos que consumimos. Se ha encontrado que estas partículas se encuentran en la carne o verduras que se ingieren porque a su vez los animales o vegetales, las adquirieron de su medio ambiente. Además, los MNPs también pueden estar presentes en los alimentos por el contacto con plásticos usados en su procesamiento o almacenamiento.

La mayoría de los estudios de los efectos tóxicos de los MNPs en organismos vivos, realizados por varios grupos de investigación en todo el mundo, son relativamente recientes. Se han realizado estudios *in vitro* utilizando células y tejidos representativos de algunos órganos, que muestran que los MNPs pueden ocasionar efectos citotóxicos e inflamatorios y que estos efectos dependen del tipo de polímero, de su tamaño y forma, así como de su concentración. El tipo de células y tejidos que más se han estudiado corresponden al sistema digestivo ya que la vía altamente probable de ingreso de MNPs al organismo, es la ingestión. Se ha encontrado que puede haber bioacumulación de MNPs en líneas celulares de cáncer colorrectal, y que pueden actuar como catalizadores para la progresión tumoral y, por tanto, para la metástasis. También se han comparado tejidos provenientes de pacientes con cáncer colon rectal con los de pacientes sanos y se han encontrado que existe un número muy superior de MNPs en los tejidos afectados por el cáncer (Cetin *et al.*, 2023).

Estudios *in vivo* se han realizado utilizando ratones, encontrando, por ejemplo, que los MNPs pueden inducir daño en el sistema renal (La Porta *et al.*, 2023). Otro estudio impactante es el que realizaron también con ratones a los cuales se les administraron nanopartículas de poliestireno, después de dos horas de haberlas ingerido se encontró que estas partículas habían traspasado la barrera hematoencefálica (Kopatz *et al.*, 2023).

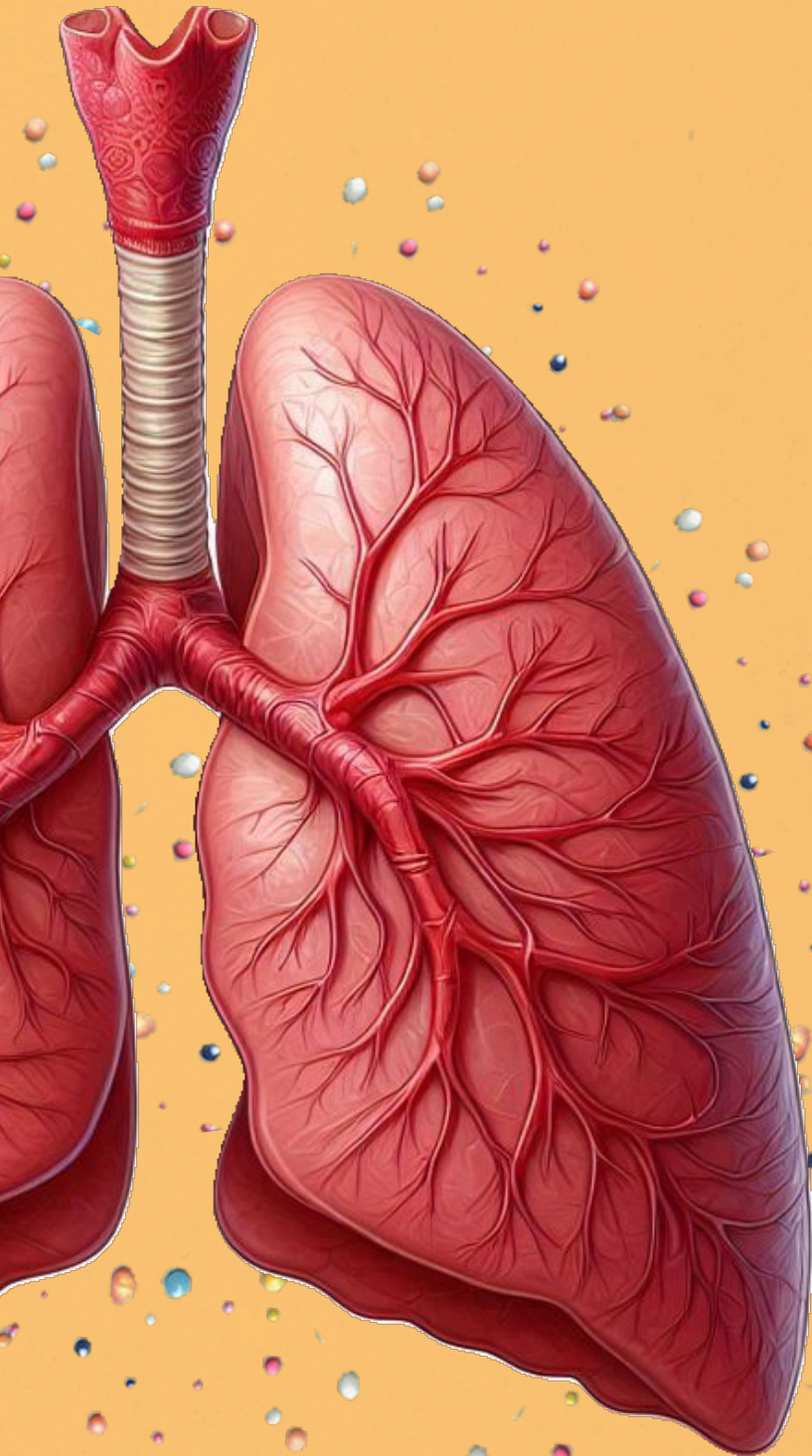


MNPs en el polvo urbano

Existen tres vías de exposición a los micro plásticos: oral, inhalación y contacto con la piel. Una cantidad importante de estudios por contaminación y efectos de los MNPs se han centrado en el sistema digestivo, esto debido a que los alimentos son una de las principales vías de ingreso de estas partículas, sin embargo, hay otra vía principal, y es a través del aire que se respira. Entre más pequeñas son las dimensiones de los MNPs, su transporte por el aire es más probable, ya que, se pueden trasladar por la acción del viento con velocidades de hasta 95 km/h (Allen et al., 2019). Estas micropartículas de plásticos sintéticos forman parte del material particulado que transporta diferentes sustancias de determinada composición, formas y dimensiones, como son iones, compuestos orgánicos, metales, núcleos de carbono y MNPs, entre otras sustancias. Las principales fuentes de MNPs en el aire, son fibras textiles, neumáticos y desechos plásticos en general. Estos fragmentos pueden tener diferentes formas y tamaños, así como ir acompañadas por otras sustancias químicas que se utilizan en la fabricación de polímeros sintéticos como estabilizadores, retardantes de flama, colorantes, metales, antioxidantes o biocidas, muchos de ellos tóxicos (Vattanasit et al., 2023).

Se ha encontrado que los MNPs están a altas concentraciones en ciudades industrializadas, así también, diversos estudios han mostrado que la presencia de estas micropartículas puede ser mayor al interior de los hogares, porque se generan a partir de los diversos productos que se utilizan, como son los cosméticos, instrumentos como escobas, cepillos de fibras plásticas que son sometidas a abrasión, productos de limpieza, textiles sintéticos de vestir o de muebles, entre otros.





Los MNPs que se inhalan pueden ser más peligrosos para la salud humana porque al ingresar por el sistema respiratorio significa que sus dimensiones son más pequeñas y esto implica que pueden bioacumularse en los tejidos de los órganos, principalmente en los pulmones y lo que no se deposita se desecha a través del esputo. Estudios hechos *in vitro* y *in vivo*, sugieren que los MNPs pueden dañar la barrera epitelial pulmonar produciendo inflamación y ocasionando que puedan ingresar alérgenos, y sustancias tóxicas al líquido intersticial y al torrente sanguíneo. Además, la exposición a MNPs altera la capacidad antioxidante de las células epiteliales bronquiales provocando estrés oxidativo. También, estudios muestran que los MNPs pueden interactuar con los tensoactivos que recubren los alveolos pulmonares alterando sus funciones y provocando daño pulmonar. Todo esto puede favorecer el desarrollo, o empeorar, enfermedades pulmonares como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (Lu et al., 2022).

En general se puede considerar que la concentración de MNPs en el aire es relativamente baja, sin embargo, la exposición prolongada puede tener consecuencias, como ya se mencionó, en personas que tienen problemas en el sistema respiratorio, por ejemplo, con enfermedades alérgicas, ya que, hay la posibilidad que la coexposición a microplásticos y alérgenos pueda exacerbar sinérgicamente la enfermedad.

Detección y caracterización de MNPs en polvo urbano

Dentro del marco del proyecto interinstitucional IPNVIIEP 2024-2025, está planeado analizar el contenido de microplásticos en el polvo urbano, por lo que las muestras se coleccionarán en lugares cercanos a donde se colocarán los detectores de material particulado.

La detección y caracterización de los microplásticos consta de varias etapas, e inicia con el muestreo adecuado del polvo, el cual se debe coleccionar en ausencia de viento y lluvia, usando instrumentos que no sean de materiales plásticos. Posteriormente, las muestras se deben someter a un proceso de tamización y secado a temperaturas adecuadas que permitan eliminar la humedad sin llegar a deteriorar o fundir las partículas plásticas presen-

tes. Después, las muestras se someten a un proceso de digestión para eliminar la materia orgánica que puede interferir en la detección de MNPs, para ello se pueden utilizar diversas sustancias como es peróxido de hidrógeno o ácidos. Una vez que se eliminó la materia orgánica, los MNPs, se separan utilizando el método de flotación usando sales inorgánicas cuya densidad sea mayor a los microplásticos que se quieren detectar. Las muestras se someten nuevamente a un proceso de secado y están listas para poder detectar y caracterizar microplásticos. En el trabajo que se planea realizar se utilizará la técnica IR-FT, que permitirá identificar microplásticos de dimensiones mayores a 5 m.



Sugerencias para disminuir la formación de MNPs

Todos los seres humanos usamos en forma cotidiana materiales plásticos que muy probablemente lleguen a descomponerse formando MNPs. Hay varias maneras en que podemos contribuir a la disminución de la formación de estas micropartículas, es decir, debemos pensar y actuar para minimizar en lo posible, el uso de plásticos. Por ejemplo, podemos usar, en nuestros hogares, fibras naturales (como Luffa o zacate) para todas las labores de limpieza, llevar trastes reutilizables cuando compramos comida, bolsas para hacer compras, ir a expendios donde compremos a granel líquidos de limpieza, evitar la compra excesiva o innecesaria de ropa con materiales sintéticos, en fin, todos podemos pensar de qué manera podemos disminuir el uso de plásticos. También podemos llevar a centros de acopio los plásticos que lleguemos a utilizar. Por otro lado, podemos hacer labor de concientización con personas que nos rodeen y que este pensamiento se extienda de modo que los gobiernos legislen para disminuir la producción y el uso de plásticos.



Referencias

1. Allen S., Allen D., Vernon R. P. Le Roux G., Durántez Jiménez P., Simonneau A., Binet S., Galop D., (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment, *Nature Geoscience*, 12, 339-344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335->
2. Cetin M., Miloglu F.D., Baygutalp N. K., Ceylan O., Yildirim S., Eser G., Gul H. İ, (2023). Higher number of microplastics in tumoral colon tissues from patients with colorectal adenocarcinoma, *Environmental Chemistry Letters*, 21:639-646. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01560-4>
3. Kopatz V., Wen K., Kovács T., Keimowitz A. S., Pichler V., Widder J., Vethaak A.D., Hollóczki O., Kenner L.(2023), Micro- and Nanoplastics Breach the Blood-Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed *Nanomaterials* 13, 1404. <https://doi.org/10.3390/nano13081404>.
4. La Porta E., Exacoustos O., Lugani F., Angeletti A., Chiarenza D. S., Bigatti C., Spinelli S., Kajana X., Garbarino A., Bruschi M., Candiano G., Caridi G., Mancianti N., Calatroni M., Verzola D., Esposito P., Viazzi F. , Verrina E., Ghiggeri G.M.,(2023). Microplastics and Kidneys: An Update on the Evidence for Deposition of Plastic Microparticles in Human Organs, Tissues and Fluids and Renal Toxicity Concern, *Int. J. Mol. Sci.* 2023, 24, 14391. <https://doi.org/10.3390/ijms241814391>.
5. Leslie, H.A., van Velzen, M.J.M., Brandsma, S.H., Vethaak, A.D., Garcia-Vallejo, J.J., Lamoree, M.H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environ. Int.* , 163, 107199. doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199
6. Lu K, Zhan D, Fang Y, Li L, Chen G, Chen S and Wang L, (2022). Microplastics, potential threat to patients with lung diseases. *Front.Toxicol.*, 4, 958414.[doi: 10.3389/ftox.2022.958414](https://doi.org/10.3389/ftox.2022.958414)
7. OECD (2022), *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
8. Schmid, C., Cozzarini, L., & Zambello, E. (2021). Microplastic's story. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111820. <https://doi.org/10.1016/J.MAR-POLBUL.2020.111820>
9. Vattanasit U., Kongpran J., Ikeda A., (2023). Airborne microplastics: A narrative review of potential effects on the human respiratory system, *Science of the Total Environment* 2023, 904, 166745. <https://doi.org/10.1016/j.scito->



LA CALIDAD DEL AIRE EN PUEBLA Y SU IMPACTO EN PACIENTES CON ASMA ALÉRGICA

Jorge Andrés Naranjo Vallejo
Juan Jesús Ríos López
Marco Antonio Herrera García
doctornaranjovallejo@gmail.com



LA CALIDAD DEL AIRE Y EL ASMA ALÉRGICA

Los llamados contaminantes criterio, son aquellos contaminantes atmosféricos que tienen implicaciones a la salud y para los cuales existen límites máximos permisibles de concentraciones en el aire ambiente, es decir están normados. La finalidad de poner Normas a los contaminantes criterio es garantizar el bienestar de la población al proteger la salud humana. Entre los contaminantes criterio se encuentran gases como el ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), pero también se consideran contaminantes criterio a las partículas de aerosoles como las llamadas partículas gruesas (PM₁₀) y las partículas finas (PM_{2.5}) de las cuales ya se ha hablado en el capítulo.

Los contaminantes criterio en general se presentan de manera recurrente y con cierta abundancia en la mayoría de los centros urbanos. En el caso de la Ciudad de Puebla, los contaminantes criterio en forma de gas regularmente se encuentran por debajo de los niveles de riesgo. Sin embargo, en el caso de las partículas de aerosoles no siempre se tienen buenos niveles. Esto se debe a que alrededor de la Ciudad de Puebla, y en algunas partes al interior, existen zonas de cultivos y labranza, la quema de leña y, además muy frecuentemente, se presenta la caída de ceniza volcánica. Así mismo, en ciertas épocas del año, las plantas generan alérgenos como el polen, recordando que los alérgenos son sustancias que pueden causar una reacción "exagerada" del sistema inmunológico, es decir alergias. Los granos de polen son de un tamaño microscópico, alrededor de decenas de micrómetros, y por esta razón son considerados como partículas gruesas (PM₁₀). Haciendo un parentésis, recomendamos ampliamente al lector realizar una búsqueda

en internet fotografías de polen desde el microscopio, ya que presentan una diversidad de formas y de formidables estructuras. Continuando con nuestra exposición sobre los alérgenos, debemos mencionar que, en el aire ambiente que respiramos también se encuentran esporas de hongos y fragmentos de polen de menor tamaño, es decir partículas finas (PM_{2.5}) que pueden penetrar en las regiones alveolares del pulmón. Ahora bien, aunado a esto, las concentraciones y la potencia o capacidad alérgica de estos aeroalérgenos están cambiando debido al calentamiento global, esto debido a que periodos más prolongados de altas temperaturas favorecen una mayor abundancia de estos alérgenos, denominados bioaerosoles, como el polen y las esporas.

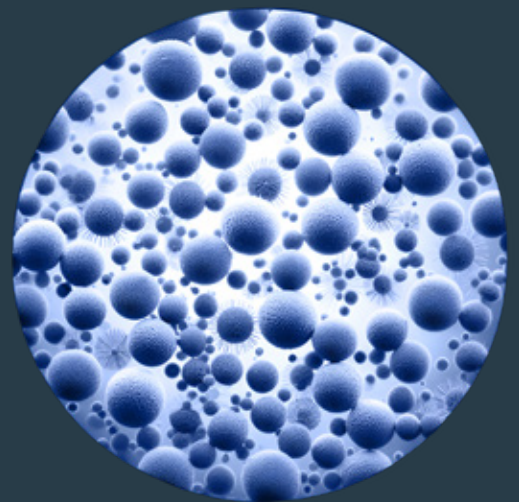
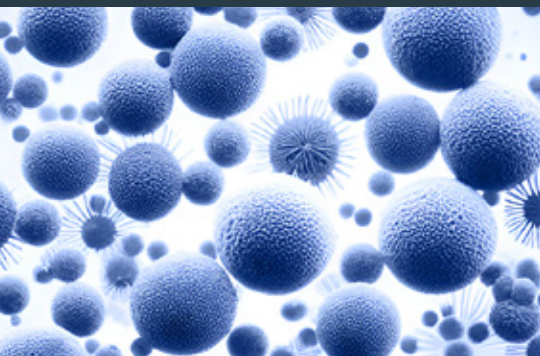




Figura 1. De lado izquierdo se muestran diferentes patrones o formas en la superficie del polen de diferentes especies, mientras que del lado derecho tenemos un ejemplo de cómo las plantas liberan bioaerosoles (polen).

El potencial de los alérgenos, contenidos en los bioaerosoles, se ve incrementado cuando además se presenta en presencia de contaminantes criterio como, el O₃ y el NO₂. La exposición a alérgenos desencadena una enfermedad crónica llamada asma alérgica. Esta es una enfermedad que afecta a 358 millones de personas a nivel mundial, y representa la segunda causa de muerte entre las enfermedades respiratorias crónicas. En este contexto, explorar la relación entre la calidad del aire y el descontrol clínico en pacientes con asma alérgica se vuelve imprescindible para entender cómo la contaminación agrava esta condición. Por esta razón, en el Hospital Universitario de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla - BUAP, estamos realizando investigación de la relación que pudiera presentar las concentraciones de contaminantes criterio (gases y partículas de aerosoles) con severidad de casos de asma, a través del proyecto interinstitucional IPN-BUAP.





LA CALIDAD DEL AIRE EN PUEBLA

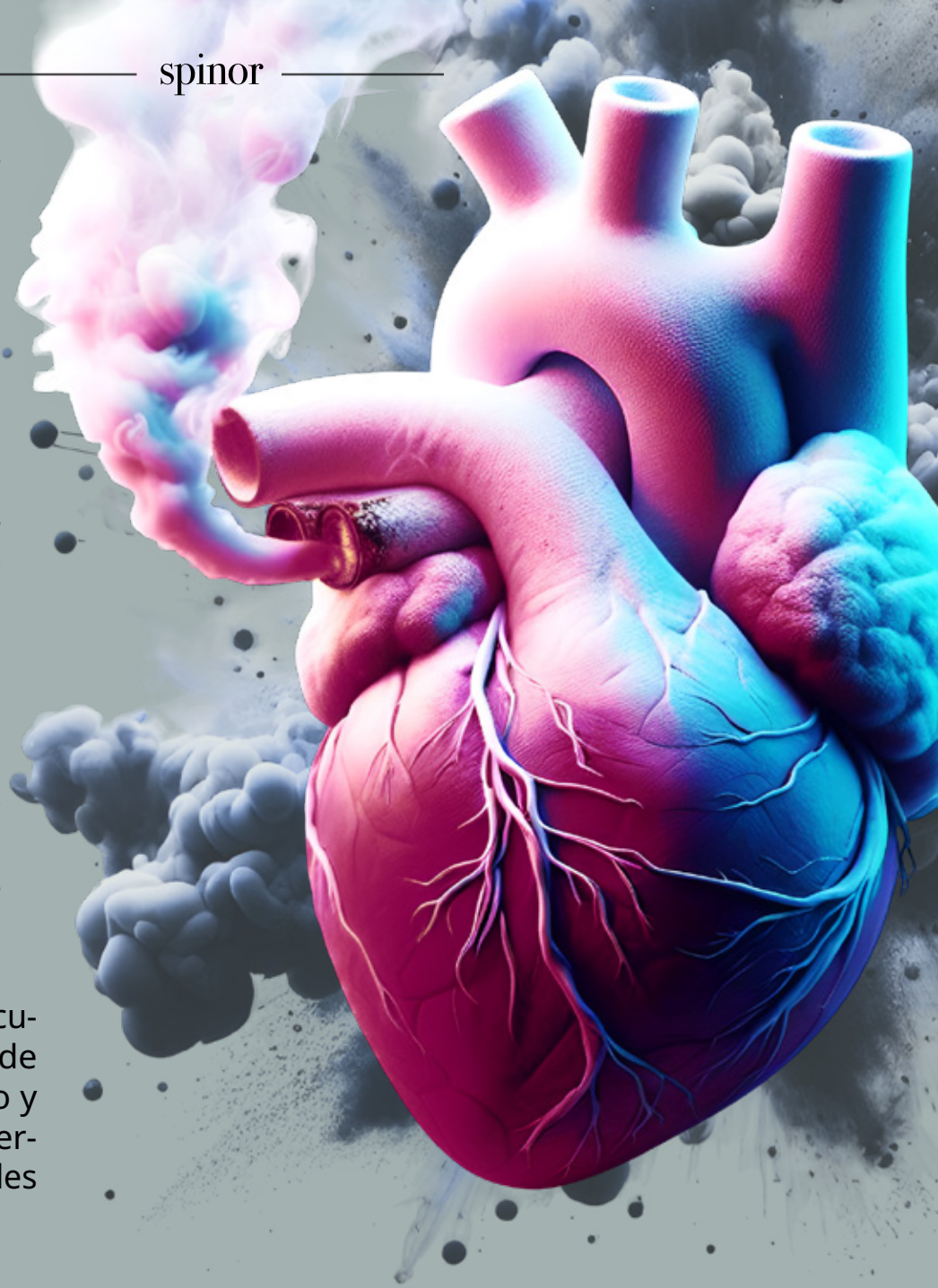
Los contaminantes criterio en zonas urbanas, como la ciudad de Puebla, se generan por actividades humanas, como el tráfico vehicular, las industrias y la quema de combustibles fósiles y, como ya hemos mencionado, también existen de origen natural, como es el caso de los bioaerosoles o la ceniza del volcán. Para evaluar los niveles de contaminación que produce la sinergia de los contaminantes criterio, y de su impacto en la salud,, se cuenta con una herramienta denominada el Índice de Calidad del Aire (ICA). Este ICA se calcula con una fórmula matemática que incorpora, en ciertas proporciones, las concentraciones de los contaminantes criterio que se miden en la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA). La REMA cuenta con estaciones distribuidas estratégicamente en diferentes puntos de la ciudad y miden las concentraciones de los contaminantes criterio en tiempo real. El ICA se separa en rangos de valores para catalogar la calidad del aire y su impacto en la salud pública.

ICA	Calidad	Descripción
0-50	Buena	Aire sin riesgos para la salud
51-100	Moderada	Aire aceptable, aunque con un ligero riesgo para personas sensibles
101-150	Mala	Aire perjudicial para grupos sensibles
151-200	Muy mala	Riesgos para toda la población, especialmente grupos vulnerables
201-300	Extremadamente mala	Riesgo alto para toda la población
301-500	Peligrosa	Riesgo muy alto con posibles emergencias sanitarias

Durante la época secas calientes (marzo, abril y mayo), la falta de lluvia incrementa la cantidad de polvo, las altas temperaturas y otras partículas en el aire, mientras que en invierno las bajas temperaturas favorecen la formación de ozono cerca del suelo. Estas fluctuaciones afectan especialmente a personas con enfermedades respiratorias, niños y adultos mayores. Además, los contaminantes presentes en el aire no solo afectan a los pulmones, sino también al sistema inmunológico, debilitándolo y aumentando la susceptibilidad a infecciones respiratorias.

Por ejemplo, el material particulado de menor tamaño puede entrar al torrente sanguíneo y generar inflamación en el cuerpo, exacerbando enfermedades respiratorias crónicas.

Estudios recientes destacan que la contaminación por PM2.5, no solo afecta a los pulmones, sino también al metabolismo y la salud general de las personas. La exposición prolongada a este contaminante puede alterar el funcionamiento normal del cuerpo, aumentando el riesgo de obesidad, que se asocia con otros problemas como la resistencia a la insulina y enfermedades del corazón. Además, la inflamación generada por el exceso de grasa corporal afecta aún más las vías respiratorias. Este círculo vicioso, en el que la contaminación empeora la obesidad y ambas agravan el asma, pone en evidencia cómo el aire contaminado impacta tanto en la respiración como en otros aspectos de la salud. La REMA también permite identificar patrones estacionales y alertar a las comunidades más vulnerables.



Esto resulta especialmente útil para diseñar campañas de prevención y estrategias de mitigación localizadas. Cabe mencionar que, en los últimos años, los reportes generados por esta red han señalado un incremento en los días con índices de calidad del aire clasificados como “malos”, especialmente en zonas cercanas a parques industriales y ejes viales de alta circulación. En el año 2023, los días con peor calidad del aire en Puebla estuvieron marcados por altos niveles de material particulado (PM10 y PM2.5) y ozono. Los días más destacados fueron:

- 5 de abril de 2023: Se registró la mayor concentración de partículas PM2.5 en 24 horas, alcanzando el 219% del límite máximo permitido. Este episodio también coincidió con la temporada seca y la actividad volcánica.
- 21 de mayo de 2023: Este día se registró la mayor concentración de partículas PM10 del año, alcanzando un 351% por encima del límite permitido en 24 horas. Este evento estuvo asociado con la intensa actividad del volcán Popocatepetl.
- 13 de junio de 2023: El nivel de ozono alcanzó su pico máximo atribuido a condiciones meteorológicas desfavorables y alta radiación solar, con una concentración del 134% de su límite permitido.



IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN EN LA SALUD RESPIRATORIA

El deterioro de la calidad del aire tiene consecuencias graves en la salud de la población. Entre las principales enfermedades asociadas están:

Alergias: La contaminación ambiental, especialmente por partículas como el PM2.5 y gases irritantes como el O₃, agrava los síntomas en personas con alergias respiratorias. Estos contaminantes aumentan la sensibilidad de las vías respiratorias y exacerbando respuestas alérgicas como congestión nasal, estornudos frecuentes, picazón en la garganta y ojos llorosos. Las sustancias químicas presentes en el aire contaminado también pueden potenciar la respuesta alérgica al entrar en contacto con desencadenantes naturales como el polen o ácaros, entre otros. Los cuadros alérgicos suelen ser más frecuentes y severos en épocas de alta contaminación, como durante el invierno o en zonas urbanas densamente pobladas.

Asma: Los altos niveles de contaminación ambiental son un factor importante en el aumento de la incidencia y severidad de los cuadros de asma no controlado. Contaminantes como el NO₂ y O₃ irritan las vías respiratorias, provocando inflamación, aumento en la producción de moco y constricción de los bronquios, lo que dificulta la respiración. En personas con asma, la exposición prolongada a estos contaminantes puede desencadenar ataques más graves y frecuentes, reduciendo significativamente su calidad de vida. Los niños y adolescentes son especialmente vulnerables, ya que sus sistemas respiratorios están en desarrollo, con vías respiratorias de calibre más pequeño.

Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC): La exposición prolongada a contaminantes como el NO₂ y el SO₂ puede causar daños irreversibles en las vías respiratorias. Estas sustancias inflaman y destruyen lentamente el tejido pulmonar, reduciendo la capacidad respiratoria con el tiempo. En pacientes con EPOC, la contaminación del aire empeora los síntomas, como la tos crónica y la dificultad para respirar, y puede provocar exacerbaciones graves que requieran hospitalización. Los adultos mayores y las personas que trabajan en entornos altamente contaminados, como fábricas, están entre los grupos más afectados.

Infecciones respiratorias: Los contaminantes del aire, como el CO y el material particulado, debilitan las defensas naturales de los pulmones al reducir la función de los cilios, pequeñas estructuras que eliminan bacterias y virus. Esto aumenta la probabilidad de infecciones como la neumonía. Además, la contaminación puede agravar infecciones preexistentes, prolongando su duración y dificultando el tratamiento. En los niños pequeños, las infecciones respiratorias recurrentes pueden tener efectos duraderos en el desarrollo pulmonar, mientras que en adultos mayores pueden aumentar significativamente el riesgo de complicaciones graves o incluso de muerte.



En los niños, los efectos son particularmente preocupantes, ya que la contaminación puede afectar el desarrollo de sus pulmones, reduciendo su capacidad respiratoria y predisponiéndolos a enfermedades crónicas en la adultez. Las escuelas cercanas a carreteras o zonas industriales, son puntos críticos donde los niños están más expuestos a contaminantes.

Un estudio reciente realizado en Monterrey, y publicado en 2024, encontró que las personas expuestas a altos niveles de PM10 requerían más visitas al médico por problemas respiratorios graves.

Esto refleja una tendencia que también podría observarse en Puebla, dado que ambas ciudades comparten condiciones de alta urbanización y tráfico intenso. Adicionalmente, los adultos mayores son otro grupo vulnerable. La exposición prolongada al material particulado y gases como el ozono han sido vinculados con un aumento en las tasas de hospitalización por enfermedades respiratorias agudas y crónicas, así como con el agravamiento de afecciones cardiovasculares. Esto pone de manifiesto la necesidad de monitorear constantemente las fuentes de contaminación y aplicar medidas correctivas.



UNA HERRAMIENTA EN EL PACIENTE CON ASMA LLAMADA FeNO

La contaminación del aire irrita las vías respiratorias y genera inflamación. Para evaluar la inflamación de las vías respiratorias, de manera no invasiva, se emplea la medición de la fracción exhalada de óxido nítrico conocida como FeNO. Normalmente, el FeNO se genera en el metabolismo de las células respiratorias, pero su producción aumenta significativamente durante procesos inflamatorios, especialmente cuando están involucradas células inmunitarias conocidas como eosinófilos. En personas con asma no controlada, los niveles de FeNO en el aire exhalado son más altos de lo normal, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para estimar la inflamación y ajustar tratamientos según las necesidades del paciente. La medición de FeNO es sencilla, rápida e indolora. Se realiza con dispositivos especializados que registran la concentración de óxido nítrico en partes por billón (ppb) a partir de una muestra de aire exhalado. Este método, seguro para todas las edades, es ideal para consultas médicas de rutina, ya que proporciona información en tiempo real. Una disminución en los niveles de FeNO sugiere que la inflamación está bajo control, lo que permite ajustar o reducir gradualmente el tratamiento. Además de su utilidad en el manejo del asma, el FeNO es un indicador clave para entender cómo los factores ambientales afectan la salud respiratoria. Estudios recientes muestran que las personas expuestas a altos niveles de contaminación tienen niveles más elevados de FeNO. Por ejemplo, en Monterrey, un estudio reveló que, los pacientes asmáticos que vivían a menos de 200 metros de carreteras principales, presentaban un peor control del asma y niveles significativamente más altos de FeNO en comparación con quienes vivían en áreas menos contaminadas. Este patrón se repite en zonas industriales o cercanas a fuentes de contaminación constante, lo que subraya la relación entre la calidad del aire y la inflamación respiratoria.



Figura 1. Ilustración de la prueba para medir el FeNO en pacientes con asma en el Hospital Universitario de la BUAP.

MEDIDAS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Es fundamental que tanto las autoridades como la sociedad trabajen juntas para reducir la contaminación del aire. Algunas acciones clave incluyen:

- **Promover el transporte público y alternativo:** Reducir el uso de automóviles particulares disminuye las emisiones de gases contaminantes.
- **Controlar las emisiones industriales:** Implementar tecnologías más limpias y monitorear estrictamente las emisiones de las fábricas.
- **Fomentar la reforestación urbana:** Los árboles ayudan a filtrar el aire y reducir el impacto de los contaminantes.
- **Educar a la población:** Crear conciencia sobre los riesgos de la contaminación y cómo protegerse, evitar actividades al aire libre en días de alta contaminación.

Además, implementar programas escolares enfocados en el impacto ambiental puede fomentar una cultura de sostenibilidad desde edades tempranas. Las autoridades locales también pueden desarrollar planes de contingencia para reducir la exposición en días con índices elevados de contaminación, como restricciones vehiculares o la suspensión de actividades al aire libre. Una estrategia innovadora podría incluir el uso de sistemas de monitoreo personal mediante aplicaciones para dispositivos móviles inteligentes, los cuales permitirían a los ciudadanos identificar los niveles de contaminación en su entorno inmediato. Estas herramientas, combinadas con campañas de concienciación, podrían facilitar decisiones informadas sobre cómo y cuándo reducir la exposición a contaminantes.

Finalmente, la creación de incentivos fiscales para empresas que adopten tecnologías limpias y el fortalecimiento de las regulaciones ambientales, son pasos necesarios para garantizar un aire más limpio y saludable en el área metropolitana de Puebla.

Informe Anual de Calidad del Aire Zona Metropolitana del Valle de Puebla ZMVP. Gob. mx. (s/f). Recuperado el 8 de enero de 2025, de https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/documents/Reporte_Anual_2023_Calidad_del_Aire.pdf

de Lira-Quezada, C. E., González-Díaz, S. N., Cotera-de Lira, A. G., Macouzet-Sánchez, C., Acuña-Ortega, N., Guzman-Avilán, R. I., & Macías-Weinmann, A. (2024). The association of air pollution in respiratory allergy: Its impact in an industrial city. *The World Allergy Organization Journal*, 17(2), 100867. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2023.100867>

Çelebi Sözen, Z., Treffeisen, E. R., Özdel Öztürk, B., & Schneider, L. C. (2023). Global warming and implications for epithelial barrier disruption and respiratory and dermatologic allergic diseases. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 152(5), 1033–1046. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2023.09.001>

Chen, X., Liu, F., Niu, Z., Mao, S., Tang, H., Li, N., Chen, G., Liu, S., Lu, Y., & Xiang, H. (2020). The association between short-term exposure to ambient air pollution and fractional exhaled nitric oxide level: A systematic review and meta-analysis of panel studies. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 265(Pt A), 114833. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114833>

González-Díaz, S. N., de Lira-Quezada, C. E., Villarreal-González, R. V., & Canseco-Villarreal, J. I. (2022). Environmental pollution and allergy. *Revista alergía Mexico (Tecamachalco, Puebla, Mexico: 1993)*, 69 Suppl 1, s24–s30. <https://doi.org/10.29262/ram.v69iSupl1.1010>

Larenas-Linnemann, D., Gochicoa-Rangel, L., Macías-Weinmann, A., Soto-Ramos, M., Luna-Pech, J. A., Elizondo-Ríos, A., Del Río-Navarro, B. E., Hernández-Colín, D. D., García-Maldonado, S., Zepeda, B., Martínez-Infante, E. A., & Vázquez, J. C. (2020). Consenso mexicano en relación con la fracción exhalada de óxido nítrico (FeNO) en asma 2020. *Revista alergía Mexico (Tecamachalco, Puebla, Mexico: 1993)*, 67 Suppl 2, S1–S25. <https://doi.org/10.29262/ram.v67i0.760>

Lobato, S., Salomón-Soto, V. M., Espinosa-Méndez, C. M., Herrera-Moreno, M. N., García-Solano, B., Pérez-González, E., Comba-Marcó-del-Pont, F., Montesano-Villamil, M., Mora-Ramírez, M. A., Mancilla-Simbro, C., & Álvarez-Valenzuela, R. (2024). Molecular pathways linking high-fat diet and PM2.5 exposure to metabolically abnormal obesity: A systematic review and meta-analysis. *Biomolecules*, 14(12), 1607. <https://doi.org/10.3390/biom14121607>


Mancilla-Hernández, E., Hernández-Morales, M. R., & González-Solórzano, E. (2019). Prevalencia de asma y grado de asociación de los síntomas en población escolar de la sierra norte de Puebla. *Revista alergía Mexico (Tecamachalco, Puebla, Mexico: 1993)*, 66(2), 178–183. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i2.539>

Ozdemir, C., Kucuksezer, U. C., Ogulur, I., Pat, Y., Yazici, D., Ardicli, S., Akdis, M., Nadeau, K., & Akdis, C. A. (2024). Lifestyle changes and industrialization in the development of allergic diseases. *Current Allergy and Asthma Reports*, 24(7), 331–345. <https://doi.org/10.1007/s11882-024-01149-7>

Shusterman, D. (2024). History of pollutant adjuvants in respiratory allergy. *Frontiers in Allergy*, 5, 1374771. <https://doi.org/10.3389/falgy.2024.1374771>

Sun, B. Z., & Gaffin, J. M. (2024). Recent insights into the environmental determinants of childhood asthma. *Current Allergy and Asthma Reports*, 24(5), 253–260. <https://doi.org/10.1007/s11882-024-01140-2>

Zhang, Z., Zhang, H., Yang, L., Chen, X., Norbäck, D., & Zhang, X. (2022). Associations between outdoor air pollution, ambient temperature and fraction of exhaled nitric oxide (FeNO) in university students in northern China - A panel study. *Environmental Research*, 212(Pt C), 113379. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113379>



**La conexión silenciosa entre
la contaminación del aire
por partículas de aerosoles
y la obesidad en Puebla**

Sagrario Lobato Huerta, Beatriz García Solano, Marco A. Mora Ramírez
sagrariolobato@cejus.edu.mx

El mecanismo de ingreso del material particulado al organismo

La obesidad es un problema de salud pública a nivel global, que se atribuye a factores como el estilo de vida, la genética y los cambios en el ADN, estudiados por la ciencia denominada epigenética. En años recientes la contaminación del aire se ha vinculado con la obesidad, en especial la contaminación del aire ocasionada por las partículas de aerosoles. Estas partículas, provienen de fuentes naturales, como las cenizas volcánicas, el polen, pero también son generadas por la actividad humana (antropogénicas), como las emisiones industriales, el humo del cigarro, entre otras. Como ya se ha mencionado, en los primeros capítulos de esta obra, estas partículas se clasifican de acuerdo con su tamaño. Las partículas de diámetros menores a $10\ \mu\text{m}$, son llamadas partículas gruesas (PM10) y las de diámetros menores a $2.5\ \mu\text{m}$ son llamadas partículas finas (PM2.5). Debido al tamaño diminuto de estas partículas al ser inhaladas pueden ingresar profundamente en el organismo; dentro del sistema respiratorio e incluso alcanzar el torrente sanguíneo, distribuyéndose por los distintos tejidos del organismo. Básicamente, el proceso desde que las partículas son inhaladas hasta que se acumulan en las células se puede representar



en cuatro etapas (A, B, C y D) como se muestra en la figura 1. En la primera etapa (A), durante la respiración, las partículas son inhaladas e ingresan al cuerpo a través del sistema respiratorio hasta alcanzar los alveolos pulmonares. Es posible, que una pequeña fracción sea detenida por las barreras naturales del organismo humano, como son las vellosidades y la mucosidad dentro de la nariz. Así mismo, otro mecanismo para evitar que estas partículas ingresen en el organismo humano, es el que se muestra en la etapa B, donde las partículas gruesas (PM₁₀), y aproximadamente dos tercios de las partículas finas (PM_{2.5}), son expulsadas mediante el reflejo de la tos (Riediker et al., 2019). Entonces en caso de haber tosido, (C) solo un tercio de las partículas finas atraviesa la barrera alveolar en los pulmones, y puede ingresar al torrente sanguíneo y distribuirse hacia distintos tejidos del organismo. Por último, (D) las partículas finas que alcanzaron los tejidos penetran en las células mediante un proceso llamado endocitosis, a través de espacios específicos llamados caveolas (Wei et al., 2021), donde se acumulan durante un periodo aproximado de 9 horas (Okada et al., 2021).

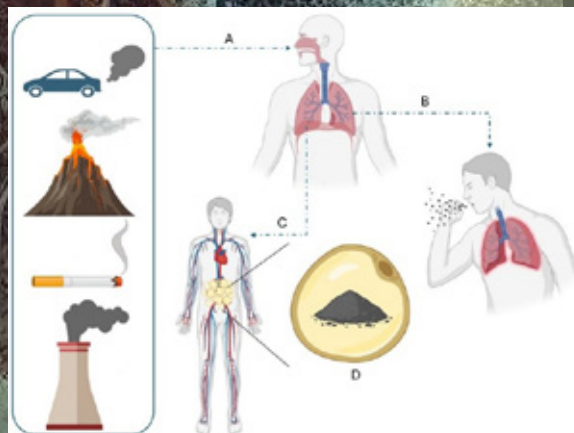


Figura 1. Esquema del trayecto por etapas de las partículas de aerosoles generadas por distintas fuentes hasta el interior celular. Elaboración propia, utilizando BioRender (<https://app.biorender.com/>).

¿Es posible que las partículas de aerosoles estén contribuyendo al aumento de peso y la obesidad en la población de Puebla?

Estudios recientes revelan que, las partículas suspendidas en el aire no solo afectan a los pulmones y al corazón, sino que también influyen en el metabolismo y el almacenamiento de grasas o lípidos en el organismo (Kurlawala et al., 2023; Zhang et al., 2023). La exposición pro-

longada a estas partículas se ha relacionado con inflamación crónica (asma), alteraciones hormonales y resistencia a la insulina (Zhao et al., 2024), factores que pueden fomentar el desarrollo de obesidad. En regiones como Puebla, donde la contaminación del aire y la obesidad avanzan paralelamente, el crecimiento urbano,

la actividad industrial y las emisiones de cenizas del volcán Popocatepetl, han incrementado la exposición a PM10 y PM2.5, lo que plantea una pregunta intrigante: ¿es posible que las partículas suspendidas en el aire estén contribuyendo al aumento de peso y a la obesidad en la población?

En este artículo, explicaremos primero como es que las partículas pueden ser inhaladas y llegar hasta la célula, después se analiza cómo estas partículas que respiramos en Puebla podrían estar influyendo silenciosamente en nuestra salud metabólica. Finalmente, presentamos uno de los mecanismos biológicos que podría ayudar a explicar la conexión entre la exposición prolongada a partículas y la obesidad.



Mecanismos biológicos para explicar la conexión entre PM y la obesidad

La regulación de los lípidos (grasas) y glucosa en el cuerpo humano se realiza mediante la vía de señalización de “receptor activado por proliferador de peroxisomas” mejor conocido como PPAR (Hu *et al.*, 2023). En el núcleo de la célula existen sustancias llamadas proteínas que se denominan receptores nucleares, los cuales regulan o modulan la expresión de los genes. Estos receptores nucleares, que incluyen a las variantes PPAR- α , PPAR- δ y PPAR- γ , están ampliamente presentes en tejidos como el hígado, los músculos y el tejido adiposo, y actúan también regulando la expresión de genes involucrados en el almacenamiento de grasa, la pro-

ducción de energía y la respuesta inflamatoria (Dey *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2023). La activación de los PPAR, especialmente del subtipo PPAR- γ , se asocia con el aumento de la sensibilidad a la insulina, la formación de nuevas células adiposas y el control de los niveles de lípidos en el torrente sanguíneo. Sin embargo, cuando el cuerpo está expuesto a contaminantes ambientales, como las PM_{2.5}, esta vía puede alterarse y contribuir a cambios metabólicos que favorecen el desarrollo de obesidad y otros trastornos metabólicos. Las partículas de aerosoles que ingresan al organismo pueden activar rutas de inflamación sistémica que influyen en la función de los PPAR, promoviendo respuestas que afectan tanto al almacenamiento como a la movilización de lípidos. La activación crónica de esta vía, inducida por la exposición a PM_{2.5}, podría provocar una alteración

en el equilibrio entre el almacenamiento y la quema de grasas.

En un estudio reciente que realizamos, observamos que la exposición prolongada a PM_{2.5} está relacionada con un aumento en la expresión de genes bajo el control de PPAR- γ en el tejido adiposo, lo cual sugiere una acumulación de lípidos y una mayor propensión a la obesidad. Este efecto se intensifica cuando la exposición a estos contaminantes coincide con una dieta rica en grasas, lo que puede potenciar los efectos negativos en el metabolismo y la salud cardiovascular (Lobato *et al.*, 2024).



Obesidad en Puebla

En las últimas tres décadas, la prevalencia de sobrepeso y obesidad ha aumentado en todo el mundo, afectando a dos de cada tres adultos, es decir 800 millones de personas la padecen, además se estima que para el año 2035 habrá 1.9 mil millones de personas alrededor del mundo que vivan con obesidad. A nivel nacional, la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) (2024) reportó que, en la población adulta, el 37.1% presenta obesidad, con una mayor prevalencia en mujeres (41.0%) que en hombres (33.0%). En Puebla, la ENSANUT (2018) indicó que, el 71.3% de la población mayor de 18 años padecía sobrepeso u obesidad, afectando en mayor medida a las mujeres, con una proporción de tres a uno. De acuerdo con la Secretaría de Salud federal, entre enero y junio de 2024 se registraron 10,798 nuevos casos de obesidad en Puebla, de los cuales más del 60% correspondieron a mujeres. Además, en 2021 la obesidad se ubicó entre las diez principales causas de morbilidad en el estado. Este problema de salud es característico de las sociedades con mayor índice de desarrollo, como es el caso de Puebla.

En este contexto es crucial considerar que las enfermedades no transmisibles, como la obesidad, pueden actuar como enfermedades asociadas a las principales causas de morbilidad como diabetes o enfermedades del corazón y, a su vez, complicar el curso de enfermedades transmisibles, lo que resalta su impacto en la salud pública. Estos datos reflejan la magnitud creciente del problema y subrayan la necesidad de implementar estrategias efectivas para su prevención y control, con un enfoque en la promoción de hábitos de vida saludables desde edades tempranas.

A modo de conclusión

Comprender cómo la vía PPAR reacciona a la contaminación ambiental en ciudades como Puebla resulta crucial, pues su alteración representa un riesgo adicional para quienes ya tienen predisposición a desarrollar obesidad y enfermedades metabólicas. Este conocimiento podría guiar futuras intervenciones en salud pública, encaminadas a reducir la exposición a contaminantes y, al mismo tiempo, mitigar sus efectos en la salud metabólica. La regulación de la vía PPAR, a través de cambios en el entorno y hábitos de vida saludables, podría ser un enfoque innovador para prevenir el impacto de la contaminación en el aumento de enfermedades crónicas en la población.



Referencias

1. Dey, A. D., Mannan, A., Dhiman, S., & Singh, T. G. (2024). Unlocking new avenues for neuropsychiatric disease therapy: the emerging potential of Peroxisome proliferator-activated receptors as promising therapeutic targets. *Psychopharmacology*, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s00213-024-06617-6>
2. Hu, P., Li, K., Peng, X., Kan, Y., Li, H., Zhu, Y., Wang, Z., Li, Z., Liu, H., & Cai, D. (2023). Nuclear Receptor PPAR α as a Therapeutic Target in Diseases Associated with Lipid Metabolism Disorders. *Nutrients*, 15(22), 4772. <https://doi.org/10.3390/nu15224772>
3. Kim, I. S., Silwal, P., & Jo, E. (2023). Peroxisome Proliferator-Activated Receptor-Targeted Therapies: Challenges upon Infectious Diseases. *Cells*, 12(4), 650. <https://doi.org/10.3390/cells12040650>
4. Kurlawala, Z., Singh, P., Hill, B. G., & Haberzettl, P. (2023). Fine particulate matter (PM_{2.5})-induced pulmonary oxidative stress contributes to changes in the plasma lipidome and liver transcriptome in mice. *Toxicological Sciences*, 192(2), 209-222. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfad020>
5. Lobato, S., Salomón-Soto, V. M., Espinosa-Méndez, C. M., Herrera-Moreno, M. N., García-Solano, B., Pérez-González, E., Comba-Marcó-del-Pont, F., Montesano-Villamil, M., Mora-Ramírez, M. A., Mancilla-Simbro, C., & Álvarez-Valenzuela, R. (2024). Molecular Pathways Linking High-Fat Diet and PM_{2.5} Exposure to Metabolically Abnormal Obesity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Biomolecules*, 14(12), 1607. <https://doi.org/10.3390/biom14121607>
6. Okada, T., Iwayama, T., Murakami, S., Torimura, M., & Ogura, T. (2021). Nanoscale observation of PM_{2.5} incorporated into mammalian cells using scanning electron-assisted dielectric microscope. *Scientific Reports*, 11(1), 12. doi:10.1038/s41598-020-80546-0
7. Riediker, M., Franc, Y., Bochud, G., Meier, R., & Rousson, V. (2018). Exposure to Fine Particulate Matter Leads to Rapid Heart Rate Variability Changes. *Frontiers in Environmental Science*, 6. doi:10.3389/fenvs.2018.00002
8. Wei, W., Wang, Y., Li, M., & Yang, M. (2021). Water-soluble fraction of particulate matter < 2.5 μ m promoted lung epithelia cells apoptosis by regulating the expression of caveolin-1 and Kruppel-like factor 5. *Journal of Applied Toxicology*, 41(3), 410-420. doi:10.1002/jat.4052
9. Zhang, Y., Shi, J., Ma, Y., Yu, N., Zheng, P., Chen, Z., Wang, T., & Jia, G. (2023). Association between Air Pollution and Lipid Profiles. *Toxics*, 11(11), 894. <https://doi.org/10.3390/toxics11110894>
10. Zhao, J., Mei, Y., Li, A., Zhou, Q., Zhao, M., Xu, J., ... & Xu, Q. (2024). Association between PM_{2.5} constituents and cardiometabolic risk factors: Exploring individual and combined effects, and mediating inflammation. *Chemosphere*, 359, 142251.

Francisco Amador Cruz
Luis David Gómez Cortes
Jenaro Reyes Matamoros

francisco.amador@iztacala.unam.mx

spinor



El papel de los **bioindicadores**
en la detección de contaminantes
ambientales en los hábitats
naturales y urbanos

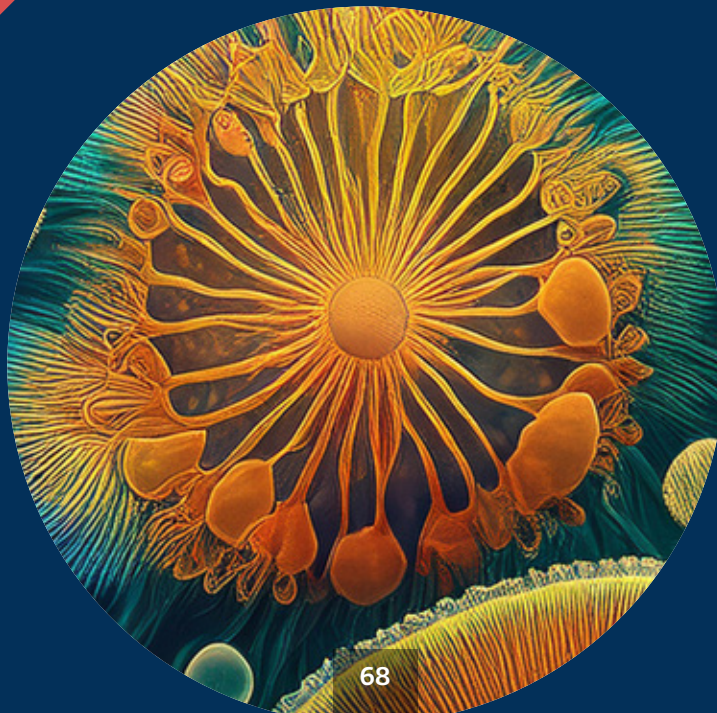
Los bioindicadores y biomonitores son organismos que reflejan las condiciones ambientales en las que habitan y permiten detectar la presencia de contaminantes en los ecosistemas. La diferencia entre ambos organismos es, relativamente, sutil. Un bioindicador representa a un organismo cuya presencia, ausencia o cambios en su estado fisiológico revelan alteraciones en el ambiente, de modo que, proporcionan información sobre el estado general de un ecosistema. Mientras que un biomonitor no solo detecta cambios, sino que además acumula contaminantes en sus tejidos, permitiendo conocer su concentración en el entorno, funcionando como bioacumuladores que ofrecen información específica sobre la presencia y los niveles de contaminantes dentro de un ecosistema (Wang, 2016). La sensibilidad de ambos, a los cambios ambientales, los convierte en herramientas esenciales para el monitoreo de la calidad del aire, agua y suelo, facilitando la toma de decisiones en conservación y gestión ambiental.

Dentro de los biomonitores, podemos encontrar a una gran variedad de seres vivos desde algas, fauna edáfica (siendo aquellos animales que habitan en el suelo, como insectos, lombrices y nematodos), peces, aves, musgos, líquenes, hormigas, termitas y hongos micorrícicos (hongos que establecen una fuerte relación con las raíces de las plantas, mejorando su absorción de nutrientes). Estas especies funcionan como excelentes indicadores de diversos factores de estrés ambiental, como la contaminación, la degradación del hábitat y el cambio climático (Dokulil, 2003).

Hay un gran número de ejemplos de biomonitores. Por ejemplo, en los ecosistemas acuáticos, la presencia o ausencia de ciertos organismos es clave para evaluar la calidad del agua. Las diatomeas, un tipo de microalgas unicelulares con paredes de sílice, se han utilizado ampliamente como biomonitores debido a su sensibilidad a los cambios en la composición química del agua, proporcionando información valiosa sobre la salud de los ecosistemas acuáticos (Sharma et al., 2021). Los anfibios como ranas y salamandras también son excelentes biomonitores, ya que su piel permeable los hace vulnerables a la contaminación y a alteraciones en la humedad del entorno. La diversidad de invertebrados acuáticos, como larvas de insectos y gusanos, puede indicar la cantidad de oxígeno disponible y la presencia de contaminantes orgánicos o industriales. Moluscos como mejillones y ostras acumulan toxinas y metales pesados, proporcionando información sobre la contaminación en océanos y ríos.

En los ecosistemas terrestres, algunos organismos pueden revelar cambios en la calidad del suelo y en la biodiversidad del entorno. La composición y abundancia de nematodos, hongos micorrícicos y microartrópodos (pequeños artrópodos del suelo como ácaros y colémbolos) han demostrado ser eficaces

para monitorear los impactos de diversas prácticas de gestión del suelo y el aire. Por ejemplo, esos últimos han sido utilizados para evaluar los efectos de diferentes prácticas de labranza y gestión de residuos sobre la actividad biológica y función general del suelo, ya que estos organismos responden a cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato, como su textura o la cantidad de materia orgánica (Chandra et al., 2023). Asimismo, las hormigas y termitas reflejan el equilibrio ecológico en los ecosistemas tropicales; mientras que la presencia de hongos micorrícicos en las raíces de las plantas señala la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad del suelo. Se conocen ejemplos en donde las aves insectívoras y rapaces son utilizadas para monitorear la acumulación de contaminantes en la cadena trófica (red de relaciones alimenticias entre organismos dentro de un ecosistema), ya que consumen presas contaminadas y reflejan el nivel de exposición a sustancias peligrosas; esto puede llevar al declive de las poblaciones de aves rapaces, debido a la acumulación de pesticidas organoclorados en su dieta. De manera similar, el análisis de cabellos y plumas de animales ha permitido identificar la bioacumulación de metales pesados como mercurio y plomo en diversas especies. En el ámbito agrícola, las hojas de trigo y cebada pueden reflejar la presencia de pesticidas y herbicidas en los cultivos.



La contaminación del aire puede ser detectada a través de organismos altamente sensibles a los contaminantes atmosféricos. Los líquenes y musgos, al absorber contaminantes del aire y del agua, reflejan la acumulación de sustancias tóxicas en el ambiente y han sido ampliamente empleados para monitorear la calidad del aire, ya que son sensibles a contaminantes como el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), gases generados por la quema de combustibles fósiles que afectan la calidad del aire (Nimis et al., 2002). En México, el monitoreo de musgos ha permitido identificar zonas con alta contaminación por metales pesados en la zona metropolitana de Toluca, lo que ha llevado a regulaciones más estrictas en algunas áreas urbanas (Zarazúa et al., 2013). También, algunas plantas pueden mostrar daños en sus hojas cuando están expuestas a contaminantes atmosféricos, mientras que las abejas pueden reflejar la presencia de pesticidas y otros químicos en el ambiente.

Los conocimientos adquiridos a partir del uso de biomonitores se extienden más allá de la evaluación de la salud ambiental, ya que también pueden revelar impactos potenciales en la salud humana y animal. Esto es especialmente relevante en casos de bioacumulación de sustancias nocivas, como metales pesados o contaminantes orgánicos persistentes (COPs), sustancias químicas tóxicas que permanecen en el ambiente durante largos periodos y pueden acumularse en los organismos, afectando la salud humana y ambiental (Al-Sawafi et al., 2017). En la figura se observa la estructura morfológica de las hojas de musgo, cuya disposición, en una sola capa de células, favorece la retención de contaminantes atmosféricos y permite su uso como biomonitor en estudios de calidad del aire.

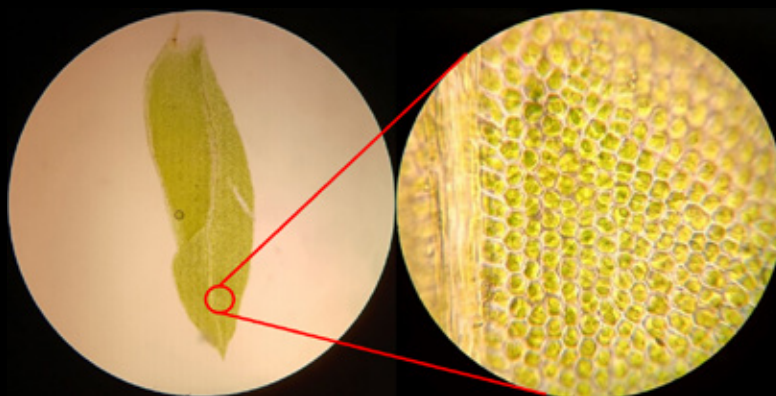


Figura 1. Hoja de musgo del género Fissidens sp. compuesta por una sola capa celular, característica que contribuye en la absorción y acumulación de contaminantes (Fotografía de David Gómez, microscopía óptica con 100 y 1000 veces de aumento).



En un mundo donde los efectos del cambio climático y la contaminación son cada vez más evidentes, los biomonitores se han convertido en aliados clave para entender y mitigar los daños ambientales antes de que sean irreversibles. Los biomonitores desempeñan un papel clave en la evaluación y monitoreo ambiental, proporcionando información valiosa sobre la salud de los ecosistemas y la presencia de contaminantes. Su sensibilidad a los cambios en el entorno los convierte en herramientas esenciales para la detección temprana de alteraciones ambientales, permitiendo la toma de decisiones fundamentadas en la gestión y conservación de los recursos naturales. Además, su estudio contribuye a comprender los efectos de la contaminación en la biodiversidad y en la salud humana, resaltando la necesidad de estrategias de conservación y restauración basadas en indicadores biológicos confiables.

En este sentido, es importante preguntarnos: ¿cómo podemos fomentar el uso de biomonitores en nuestras ciudades y comunidades? La próxima vez que observes líquenes o musgos en tu entorno, piensa en lo que pueden estar revelando sobre la calidad del aire. En un mundo donde las amenazas ambientales continúan en aumento, el empleo de biomonitores representa una herramienta fundamental para la ciencia y la sociedad, promoviendo un enfoque preventivo y sostenible en la protección del medio ambiente.

Referencias

- Al-sawafi, A.G.A., Wang, L., & Yan, Y. (2017). Cadmium accumulation and its histological effect on brain and skeletal muscle of zebrafish. *Journal of Heavy Metal Toxicity and Diseases*, 2(1).
- Chandra, P., Khippal, A., Prajapat, K. et al. (2023). Influence of tillage and residue management practices on productivity, sustainability, and soil biological properties of rice-barley cropping systems in indo-gangetic plain of India. *Frontiers in Microbiology*, 14: 1130397.
- Dokulil, M.T. (2003). Algae as ecological bio-indicators. In B.A. Markert, A.M. Breure, H.G. Zechmeister, *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*, 6, 285-327.
- Nimis, P., Scheidegger, C., & Wolseley, P. (2002). Monitoring with lichens—Monitoring lichens. *The Bryologist*, 105(3), 408.
- Sharma, G., Rahul, Guleria, R., & Mathur, V. (2019). Differences in plant metabolites and microbes associated with *Azadirachta indica* with variation in air pollution. *Environmental Pollution*, 257, 113595.
- Wang, W.-X. (2016). Bioaccumulation and Biomonitoring. In J. Blasco, P.M. Chapman, O. Campana, & M. Hampel. *Marine Ecotoxicology*, pp. 99-119.
- Zarazúa, G., Poblano-Bata, J., Tejeda-Vega, S. et al. (2013). Assessment of spatial variability of heavy metals in Metropolitan zone of Toluca Valley, Mexico, using the biomonitoring technique in mosses and TXRF analysis. *The Scientific World Journal*, 1, 426492.

LA CIENCIA EN LA CALLE: YO PUEDO MEDIR LO QUE RESPIRO

Xóchitl Cruz Núñez, Juan José Romero Cabrera, Roberto Zúñiga Mora
marco.morar@correo.buap.mx



ANTECEDENTES

El cuadro de la zona del centro histórico de la Ciudad de Puebla, se caracteriza por una alta demanda de servicios y comercios que generan una actividad importante en el aforo de personas, vehículos de transporte público y privado. Así mismo, durante los fines de semana esta característica se torna más hacia el tipo de actividades recreativas y de turismo. Esto conlleva a que, el ciudadano realice de manera cotidiana recorridos a pie que podrían significar estar respirando partículas finas y gruesas suspendidas en el aire. Ciertamente, los adultos son los principales usuarios de las calles y avenidas, pero al mismo tiempo, sobre todo en la mañana y en las horas de salida de las escuelas, también las calles se ven llenas de infantes acompañados de sus padres. En este contexto, decidimos emplear los dispositivos portátiles para medir las concentraciones de partículas (EPA, 2024) y estimar la dosis inhalada de partículas finas y gruesas durante recorridos a pie por calles y avenidas del centro histórico, lo cual denominamos experimento "A". La dosis inhalada (DI) de partículas de aerosoles (en microgramos) se calcula multiplicando la concentración de partículas, que mide el dispositivo móvil, por la tasa de ventilación (VE) y el tiempo de duración de la medición (Ramos et al., 2015). La tasa de ventilación se refiere a la cantidad de litros de aire que una persona, adulto inhala al respirar. En este estudio empleamos el valor de la tasa de inhalación diurna de un adulto como $0.01455 \text{ m}^3 / \text{min}$ (Ariunsaikhan et al., 2020).

También, es de interés medir las concentraciones de partículas a las que, estarían expuestos adultos y niños, cuando se aproximan a una calle con tráfico de vehículos particulares y de transporte público; donde los peatones (incluidos niños) frecuentemente se detienen justo al borde de la banqueta a esperar el cambio de luz en el semáforo o esperan para tomar el transporte público, en este caso microbuses de distintas rutas. Este otro experimento lo denominaremos experimento "B". Los niños además de ser la población más vulnerable a la exposición por partículas, podrían estar expuestos a concentraciones de partículas diferentes a los adultos, debido a su mayor cercanía con el suelo. Es interesante conocer si los niños por estar más cerca del suelo están expuestos a mayores concentraciones de material particulado.



Experimento “A”. Dosis inhalada de partículas durante recorridos a pie

En el experimento “A” se realizaron recorridos a pie de aproximadamente 40 minutos cada 2 horas, desde las 8:00 am hasta las 6:00 pm (GMT-5) en una ruta entre calles del Zócalo de la Ciudad de Puebla, como se muestra en la Figura 1. La ruta inicia en la esquina del Zócalo de Puebla, entre las calles 2 Sur y 3 Pte., y termina en la Av. Reforma esquina con la calle 5 Nte. Los dispositivos se colocaron a una altura de 1.60 m que es la estatura promedio de un adulto, y cada minuto durante el recorrido a pie se registraron: la hora, las concentraciones de partículas de aerosoles, las finas (PM_{2.5}) y gruesas (PM₁₀) empleando un sensor de partículas (SDS011) y la ubicación (latitud, longitud). Los dispositivos móviles fueron equipados con un sensor (GPS) que permite detectar la posición geográfica, durante los recorridos a pie en calles y avenidas de la ciudad de Puebla. Los dispositivos se alimentan con una batería recargable que tiene autonomía hasta por 8 horas continuas, tiempo suficiente para realizar los recorridos a pie. Para almacenar los datos los dispositivos cuentan con una memoria MicroSD.



Figura 1. A la izquierda se muestra un dispositivo portátil y con autonomía (8h) que mide las concentraciones de partículas finas (PM_{2.5}) y gruesas (PM₁₀) y la localización del peatón durante los recorridos (derecha) a pie en calles y avenidas del Centro Histórico de la Ciudad de Puebla.

Los resultados, mostraron que el horario de las 18:00 pm presentó los valores más altos de concentraciones de PM, con 15.78 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de partículas gruesas (PM₁₀) y 10.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de partículas finas (PM_{2.5}). En este horario la dosis estimada de PM₁₀ fue de 9.16 μg y 6.09 μg de PM_{2.5}, considerando un periodo de tiempo de 40 minutos. En cambio, en el horario de las 12:00 pm la dosis es menor, y por lo tanto más recomendable para transitar como peatón, ya que, tiene un promedio de concentración de 5.42 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de PM₁₀ y 3.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de PM_{2.5}, y en un tiempo de 40 minutos la dosis de inhalación estimada es de 3.16 μg de PM₁₀ y 1.78 μg de PM_{2.5}.

Experimento “B”. Exposición a partículas por adultos y niños mientras esperan cruzar la calle

En el experimento “B” se realizaron mediciones estáticas con varios dispositivos montados a dos alturas, una de 1.60 m y la otra de 0.80 m para evaluar la cantidad de partículas que respira un adulto y un niño respectivamente, mientras se acercan a un cruce de una avenida, y esperan el cambio del semáforo para cruzar o el transporte público. Las mediciones estáticas se realizaron sobre la calle 16 de septiembre y el cruce con la Av.11 oriente/poniente. Este cruce resulta atractivo puesto que sobre la Av.

11 oriente/poniente circulan varias rutas del transporte público (R23-A, R Azteca, R-S86, entre otras), por lo que se presenta un volumen importante de microbuses. Durante la mañana, ocurre principalmente que, las

personas descienden del transporte público para tomar la ruta peatonal de la 16 de septiembre dirección al zócalo, y acudir a sus lugares de trabajo, pero conforme transcurre el día, las personas también esperan en ese punto para abordar el transporte público. También es interesante este sitio, ya que a partir de la Av. 7 oriente/poniente en dirección hacia el zócalo la Calle 16 de septiembre, se convierte en peatonal, esto implica por supuesto un mayor flujo de peatones, pero también resulta que, la mayoría de los vehículos que circulan sobre la Calle 16 de septiembre, tienen que dar vuelta (izquierda); y ocurre que en las tardes se producen largas filas de autos que esperan el cambio de la luz del semáforo.

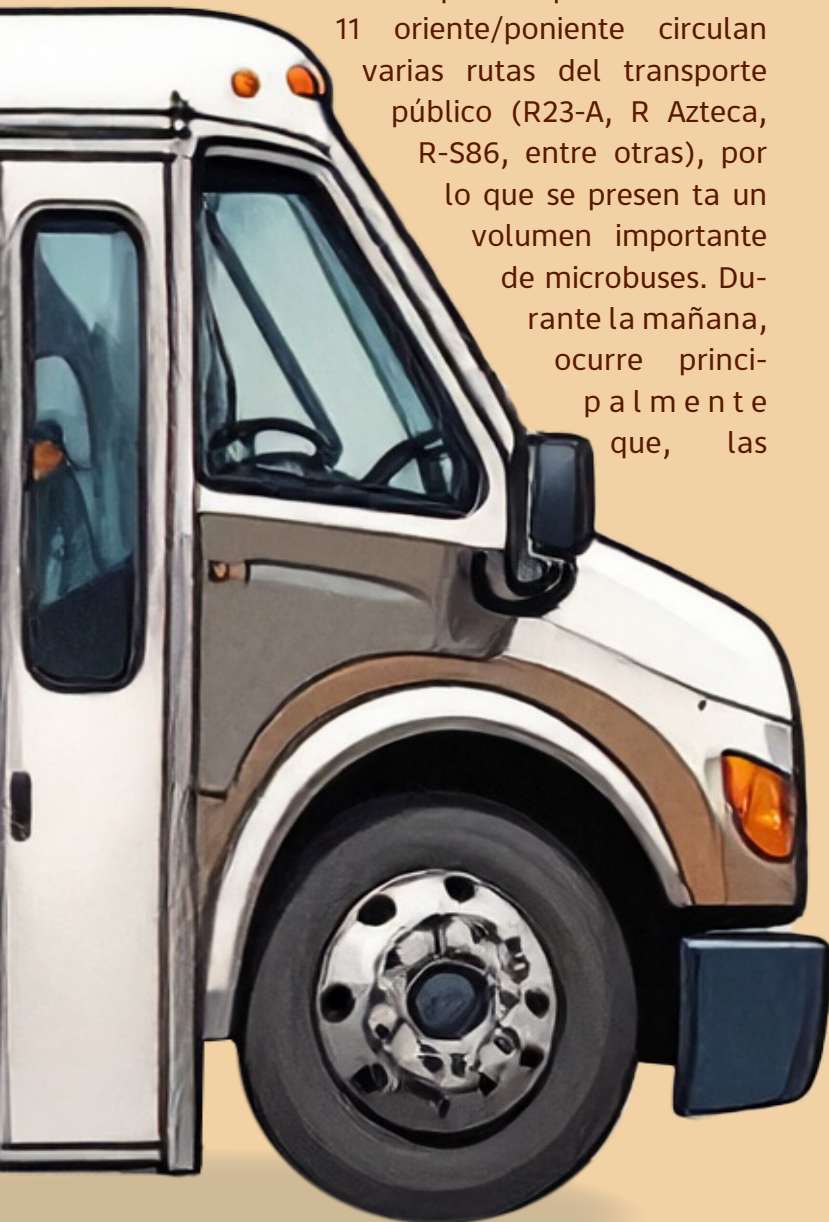


Figura 2. Esquema de la ubicación de dispositivos para medir partículas en aerosoles que respira un adulto (naranja) y un niño (verde).

Ahora se resaltan algunos de los resultados más importantes del experimento “B”. Primero, comentar que se detectó que la mayoría de los microbuses que circulan sobre la Av 11 usan gas como combustible, por lo que sus emisiones no generan incrementos en la cantidad de partículas. Sin embargo, el paso de ellos, o cuando arrancan, resuspende el

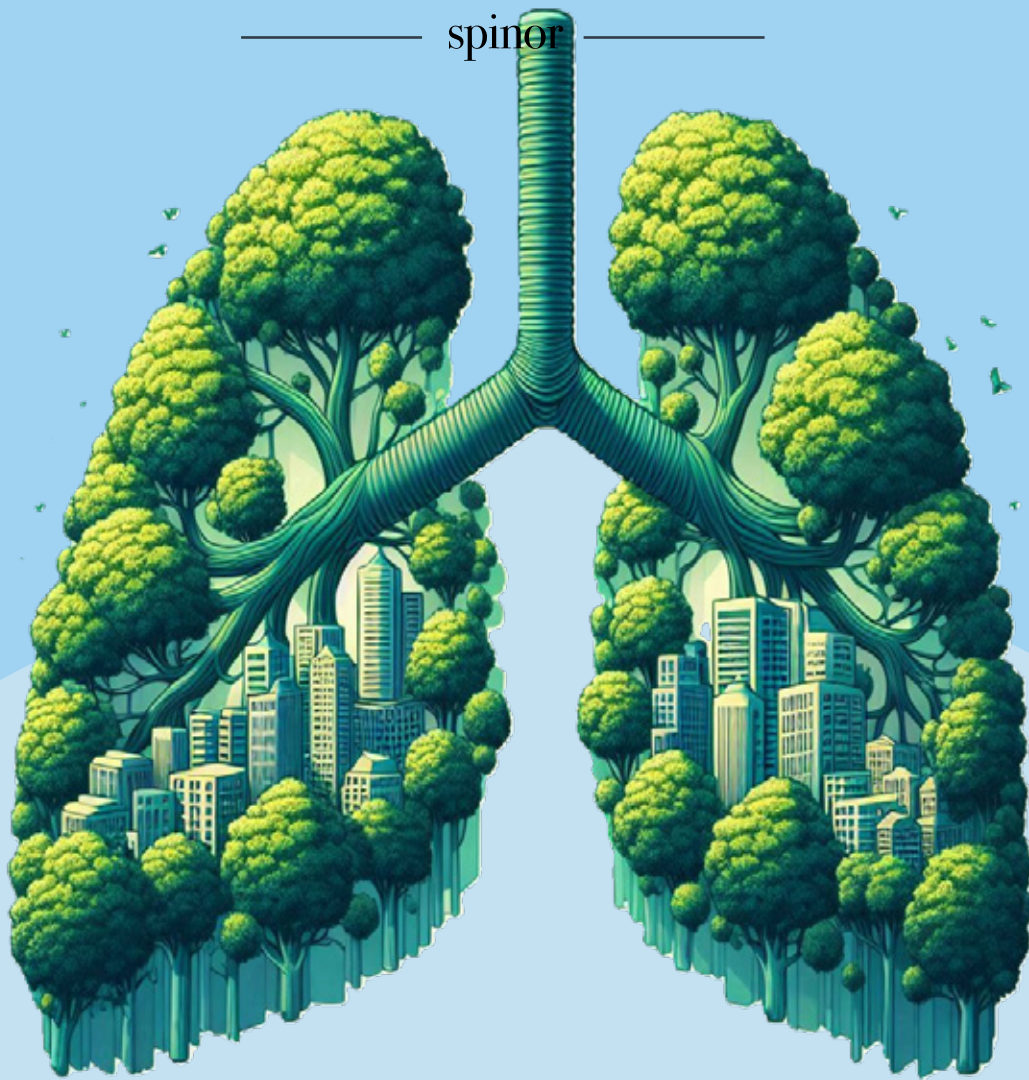
polvo que se encuentra en el suelo, lo cual si contribuye sustancialmente al aumento de las concentraciones de partículas a las que están expuestos los peatones.

Por la tarde, sobre la Calle 16 de septiembre, se forman filas de autos esperando la luz verde del semáforo para poder avanzar. Esta acumulación de autos, contribuye al incremento de las concentraciones de partículas que respiran los peatones que caminan sobre la Calle 16 de septiembre, pero también notamos que cuando el viento sopla con mayor intensidad, a pesar de la acumulación de autos no se incrementaban las concentraciones de partículas. En otras palabras, la ventilación por efectos mecánicos del viento, ayuda a mejorar la calidad del aire ambiente en esta época del año. Notese que las mediciones se realizaron al final de la época de lluvias, cuando en general la cantidad de partículas de aerosoles es menor en comparación con la temporada de secas-calientes (marzo a mayo), muy probablemente si el experimento se realiza en época de secas-calientes, en las tardes cuando el viento sopla, este ayudaría a resuspender una mayor cantidad de partículas del suelo y a traer polvo de otras partes de la ciudad.

Finalmente, una de las preguntas que motivo realizar el experimento "B" fue: conocer si los niños estaban expuestos a niveles de concentraciones mayores que el de los adultos. Resulta que en esta época del año (lluvias) la cercanía de los niños con el suelo ayuda a disminuir la cantidad de partículas a las que están expuestos en comparación con un adulto, de acuerdo con los resultados los niños estarían en general expuestos a concentraciones entre $5-10 \mu\text{gm}^{-3}$ menos que los adultos durante esta época del año.

Hay que recordar que el viento, al ser un fluido, tiene menor intensidad conforme estamos más cerca del suelo. Similar a lo que ocurre con el agua de un río, conforme más nos acercamos a la orilla la corriente es menor.





A modo de conclusión

Respirar un aire limpio es un derecho humano. Conocer la calidad del aire que respiramos es un derecho y un obligación del ciudadano. Disponer de herramientas como los dispositivos móviles de monitoreo de partículas permitirá que las personas puedan considerar a la calidad del aire como un factor para programar sus salidas al exterior, e identificar fuentes de emisiones en su vecindario y poder actuar en consecuencia. Prueba de lo anterior son los experimentos que hemos presentado aquí, estos permitieron medir las concentraciones de partículas gruesas (PM₁₀) y finas (PM_{2.5}), representando la exposición que tiene un peatón en el centro del estado de Puebla dependiendo el horario, la cercanía a fuentes de emisión, así como, los factores de ventilación para remover las partículas del aire ambiente, y considerar que el factor de resuspensión de partículas es relevante en cuanto al nivel de exposición de los peatones que esperan en los cruces de avenidas. Concordamos con Yoon et al., (2021) respecto a que el diseño de rutas peatonales y la distribución del tráfico vehicular, influyen en la exposición de los peatones a PM_{2.5}.

Referencias

1. Arciniégas, C. (2012, June). Diagnóstico y Control de Material particulado: Partículas Suspendidas Totales y Fracción Respirable. *Revista Colombiana de Contaminación Ambiental*, 17(8).
2. Ariunsaikhan, A., Chonokhuu, S., & Matsumi, Y. (2020). Measurement of pm2.5 based on an individual in Ulaanbaatar. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph17082701>
3. Conner, T., Clements, A., Williams, R., & Kaufman, A. (2015). Evaluación de sensores de bajo costo mediante la colocación de monitores del método de referencia federal. *Environmental Science and Technology*, 49(12), 7453-7460. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02001>
4. EPA. (2024). Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés). <https://espa.espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
5. Ramos, M. J., Vasconcelos, A., & Faria, M. (2015). Particulate matter inhalation for users of different transport modes in Lisbon. *Transportation Research Procedia*, 10, 101-106. doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.093
6. Yoon, S., Moon, Y., Jeong, J., Park, C.-R., & Park, S. (2018). A Network-Based Approach for Reducing PM_{2.5} Induced by Road Traffic in Seoul. *Journal of Environmental Health and Pollution*, 15(1), 1-10. [tps://doi.org/10.3390/land10101045](https://doi.org/10.3390/land10101045)



spinor

LA RELACION ENTRE LA CONTAMINACION DEL AIRE POR MATERIAL PARTICULADO



Jenaro Reyes Matamoros, Marco Antonio Mora Ramírez, Sergio Martín Barreiro Zamorano
jenaro.reyes@correo.buap.mx

Y LA SALUD DE LA VEGETACIÓN URBANA

La contaminación del aire es uno de los grandes problemas ambientales de nuestro tiempo, con consecuencias graves para la salud, los ecosistemas y el clima. Entre los contaminantes más preocupantes están las partículas de aerosoles (PM, por sus siglas en inglés). Estas partículas, provienen tanto de actividades humanas, como el tráfico y la industria, como de fuentes naturales, como erupciones volcánicas o tormentas

de polvo (Grantz et al., 2003). Las partículas de aerosoles no solo afectan nuestra salud, sino que también tienen un impacto importante en las plantas, que son esenciales para combatir el cambio climático y mantener el aire limpio. Las plantas absorben dióxido de carbono (CO_2) y liberan oxígeno (O_2) mediante la fotosíntesis, un proceso que necesita luz, agua y un intercambio de gases eficiente. Sin embargo, cuando las PM se depositan en sus hojas, pueden bloquear la luz solar y obstruir

Antecedentes

Los estomas, que son pequeños poros por donde las plantas “respiran”. Esto perjudica su capacidad para crecer, realizar su función ecológica y brindar servicios ecosistémicos. Así mismo, las PM pueden dañar la epidermis de las hojas, una capa que las protege del ambiente. Cuando esta barrera se ve afectada, las plantas son más vulnerables al estrés ambiental, lo que compromete su salud y su capacidad de sobrevivir. Este artículo revisa cómo las PM afectan a las plantas, centrándose en tres aspectos: la fotosíntesis, la epidermis y los estomas.

La fotosíntesis y las partículas de aerosoles

Durante la fotosíntesis las plantas convierten el CO_2 y el agua en azúcares, utilizando la luz solar como fuente de energía. No obstante, cuando las PM se acumulan en las hojas, se crea una capa que bloquea o dispersa la luz. Este bloqueo reduce la energía disponible para la fotosíntesis, lo que afecta el crecimiento de la planta, su producción de frutos y su capacidad para generar biomasa. Por ejemplo, investigaciones en el municipio de Toluca, Estado de México, encontraron que las partículas suspendidas en el aire reducen la capacidad fotosintética de

los árboles urbanos al dañar los tejidos foliares y bloquear la luz. Otros estudios señalan que las partículas más pequeñas y oscuras, como las de hollín, son las que más absorben luz, mientras que las claras, como el polvo, la dispersan en distintas direcciones, reduciendo aún más la luz que llega a las hojas (Martínez, 2017). Además, algunos elementos presentes las partículas de aerosoles pueden ser tóxicos para las células vegetales, lo que agrava los efectos negativos. En entornos urbanos, donde las emisiones de origen humano son más altas, estos problemas son aún más graves, afectando tanto a las plantas individuales como a los ecosistemas urbanos enteros. En la figura se 1 observa el depósito de partículas acumulado sobre la superficie de una hoja, generando áreas completamente oscurecidas que dificultan la penetración de la luz.



Figura 1. Esquema del trayecto por etapas de las partículas de aerosoles generadas por distintas fuentes hasta el interior celular. Elaboración propia, utilizando BioRender (<https://app.biorender.com/>).

La capa protectora de las hojas y su interacción las partículas de aerosoles

La epidermis de las hojas es una capa protectora que ayuda a las plantas a retener agua, captar luz y resistir condiciones adversas. Sin embargo, las PM pueden dañar esta barrera al depositarse sobre ella, causando pequeñas lesiones en las células epidérmicas y alterando la cutícula, una capa cerosa que protege a las hojas de la deshidratación y los patógenos. Estudios

realizados en Chile encontraron que, las PM afectan la epidermis de árboles endémicos como el quillay (*Quillaja saponaria*) y el pirul (*Schinus molle*), haciéndolos más vulnerables al estrés ambiental. Estas alteraciones reducen la capacidad de las plantas para realizar la fotosíntesis y para enfrentar condiciones extremas, como sequías o contaminación adicional (Egas et al., 2018).

Los estomas y su interacción con las PM

En botánica, los estomas son poros microscópicos de la epidermis de la planta que regulan el intercambio de gases en las plantas. Permiten que el CO_2 entre, para la fotosíntesis, y que el oxígeno salga, como subproducto; asimismo regula la pérdida de agua (H_2O).

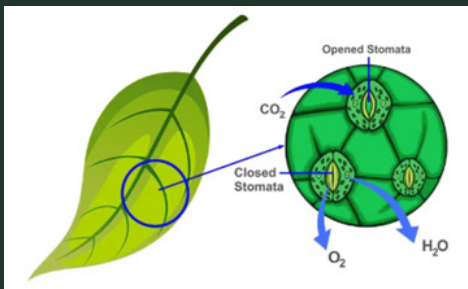


Figura 2. Diagrama del estoma y sus funciones.

Sin embargo, nuevamente cuando las PM se depositan en la hoja, pueden obstruirlos, dificultando su apertura y cierre. En casos severos, estas obstrucciones pueden causar daños graves, como clorosis (amarillamiento) o necrosis (muerte del tejido foliar). La partículas finas ($\text{PM}_{2,5}$) o ultrafinas ($\text{PM}_{1,0}$) pueden incluso penetrar en los estomas y llegar a los tejidos internos de las hojas, afectando directamente el metabolismo de las plantas. Este daño no solo afecta la fotosíntesis, sino que también altera la regulación hídrica, lo que puede ser crítico en zonas áridas o con alta contaminación (Gajbhiye et al., 2016).

La contaminación del aire representa una amenaza significativa para las plantas y los ecosistemas urbanos, como se observa en diversas ciudades del mundo (Pipal et al., 2022; Singh y Verma, 2023). En Nueva Delhi, India, una de las urbes más contaminadas del mundo, el material particulado se deposita en las hojas de árboles como el mango (*Mangifera indica*) y el neem (*Azadirachta indica*), reduciendo la fotosíntesis y provocando un amarillamiento temprano de las hojas. Esto afecta la capacidad de estos árboles para proporcionar sombra, disminuyendo el confort

térmico en áreas urbanas. En la Ciudad de México, México, la vegetación cercana a vías rápidas, como el Periférico, acumula polvo y hollín en las hojas de árboles como el ficus (*Ficus benjamina*), lo que limita su capacidad para absorber dióxido de carbono y liberar oxígeno. Además, estas partículas están relacionadas con la pérdida de vitalidad de plantas ornamentales en camellones y parques. Sin embargo, también en ciertas situaciones se considera el uso de plantas para captar y remover las partículas del ambiente.

En Los Ángeles, Estados Unidos, los cultivos urbanos y comunitarios en zonas cercanas a autopistas, con tráfico intenso, son afectados por las PM. Cultivos como lechugas y otras hortalizas no

solo ven reducida su capacidad fotosintética, sino que también acumulan partículas en sus tejidos comestibles, generando riesgos para la salud humana. Por otro lado, en Beijing, China, durante episodios de smog extremo, las PM se depositan en especies utilizadas en proyectos de restauración ecológica, como álamos (*Populus spp.*) y sauces (*Salix spp.*), reduciendo su crecimiento y afectando iniciativas de reforestación diseñadas para mejorar la calidad del aire (Xu et al., 2018). Finalmente, en Londres, Reino Unido, en áreas históricas como Westminster, los residuos de partículas procedentes de calefacciones domésticas y vehículos diésel han impactado negativamente

dines urbanos. Especies como el tejo (*Taxus baccata*) presentan menor crecimiento y vigor debido a la acumulación de partículas en sus hojas. El material particulado tiene un impacto profundo en la salud de las plantas, ya que reduce la fotosíntesis al bloquear la luz solar, lo que limita la producción

de azúcares esenciales para su crecimiento. Además, daña la epidermis, comprometiéndola su función protectora y aumentando la vulnerabilidad al estrés ambiental, y obstruye los estomas, dificultando el intercambio de gases, la respiración y la regulación del agua. Estos efectos no solo disminuyen la vitalidad de las plantas, sino que también alteran los ecosistemas, especialmente en áreas urbanas, destacando la importancia de proteger la vegetación como una medida clave para combatir la contaminación del aire y mitigar el cambio climático. Para enfrentar este problema, es fundamental adoptar prácticas sostenibles, como el uso de medios de transporte menos contaminantes y la promoción de un transporte público eficiente. Asimismo, es crucial impulsar iniciativas comunitarias enfocadas en la plantación de árboles y la recuperación de áreas verdes, contribuyendo así a la mejora de la calidad del aire. La educación ambiental también juega un rol indispensable, al generar conciencia sobre los efectos de la contaminación e inspirar acciones individuales y colectivas que protejan la biodiversidad y fomenten un entorno más saludable para todos.

Referencias

1. Egas, C., Naulin, P. I., y Préndez, M. (2018). Contaminación urbana por material particulado y su efecto sobre las características morfo-anatómicas de cuatro especies arbóreas de Santiago de Chile. *Información Tecnológica*, 29(4), 111-118.
2. Gajbhiye, T., Pandey, S.K., Kim, K.H., Szulejko, J.E., & Prasad, S. (2016). Airborne foliar transfer of PM bound heavy metals in *Cassia siamea*: A less common route of heavy metal accumulation. *Science of the Total Environment*, 573, 123-130.
3. Grantz, D.A., Garner, J.H.B., & Johnson, D.W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment international*, 29(2-3), 213-239.
4. Martínez, H., A. (2017). Captura de material particulado en hojas de árboles del Municipio de Toluca, Estado de México. Tesis de Licenciatura, UAEMex, 145 p.
5. Pipal, A.S., Dubey, S., Singh, S.P., & Taneja, A. (2022). Geographical distribution and transport of atmospheric particulate matter. In: Sonwani, S., Shukla, A. (eds) *Airborne particulate matter*. Springer, Singapore.
6. Singh, D., & Verma, S.K. (2023). Impacts of particulate matter pollution on plants. In: Aftab, T. (eds) *New Frontiers in Plant-Environment Interactions*. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham.
7. Xu, Y., Xu, W., Mo, L., Heal, M.R., Xu, X., & Yu, X. (2018). Quantifying particulate matter accumulated on leaves by 17 species of urban trees in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(13), 12545-12556.

ACERCA DE LOS AUTORES

Marco A. Mora-Ramírez

Profesor-Investigador T.C. de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP, Líder del CA-321 del ICUAP. Doctor en Ciencias (Químicas) UAM-I, actualmente investiga la contaminación del aire por partículas de aerosoles, y sus efectos en la salud. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores e investigadoras (SNII).

Carmen Cerón Garnica

Profesora Investigadora Facultad de Ciencias de la Computación
Doctorado en Educación y Tecnologías de Información y Comunicación
Perfil PRODEP SNI nivel I. Área de investigación sobre Tecnologías emergentes en Educación y Salud

Jenaro Reyes Matamoros

Profesor Investigador del Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas (CICA) del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Su investigación abarca el manejo de cultivos de temporal, la diversidad de especies comestibles en los mercados de Puebla y, más recientemente, el uso de bioindicadores para detectar contaminantes en el aire y su efecto en las plantas.

Ema Barbara Sánchez Rinza

Doctorado en Ciencias y especialización en óptica por el INAOE. Ha escrito 57 capítulos de libro nacionales e internacionales, 63 artículos en revistas nacionales e internacionales, 168 memorias en extenso en diferentes foros nacionales y extranjeros. Además, ha dirigido 36 tesis de licenciatura, ocho tesis de maestría y una tesis de doctorado.

Beatriz García Solano

Profesora-Investigadora de la Facultad de Enfermería, BUAP. SNII, Nivel I, responsable del Grupo de Investigación Interdisciplinario Bienestar y Curso de Vida Saludable en Poblaciones Vulnerables.

Xóchitl Cruz Núñez

Profesora del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM, donde realiza investigación sobre aspectos moleculares de la dinámica atmosférica de gases y partículas, como la caracterización y modelación de sus emisiones y su mitigación hasta la política del clima. Desarrolla inventarios de emisiones, monitoreo y modelación de la calidad del aire, potencial de calentamiento global, mitigación y sus co beneficios.

Sagrario Lobato Huerta

Médica cirujana por la BUAP y doctora en Ciencias Aplicadas al Aprovechamiento de los Recursos Naturales. Investiga la relación de la contaminación atmosférica por PM2.5 y la obesidad, así como en los determinantes sociales de la salud. Actualmente, es jefa del Depto. de Investigación en Salud de los Servicios de Salud del Estado de Puebla.

Francisco Amador-Cruz

Doctor en Ecología por la Universidad de Guadalajara, es profesor de ecología en la UNAM. Desarrolla herramientas novedosas para definir áreas prioritarias para la conservación, haciendo uso de indicadores de la ecología tradicional y moderna; así como protocolos basados en datos de campo o con modelados espaciales

María Karime Larios González

Estudiante de la Lic. en Física de la U. de G., en 2024 realizó una estancia en la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP para investigar la relación que guarda la abundancia de partículas de aerosoles con variables meteorológicas, mediante apoyo del programa Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico (delfín).

Roberto Zúñiga Mora

Biólogo por la BUAP y estudiante de la Maestría en Ciencias Ambientales en la misma institución. Su trabajo actual se centra en la caracterización ambiental de zonas naturales mediante el concepto de valor ecológico, apoyándose en herramientas de análisis espacial y cartografía temática.

María Patricia Amador Ramírez

Doctora en Ciencias Químicas en el área de Físicoquímica, investigación en termoquímica, experiencia en calorimetría, análisis térmico y desarrollo de métodos analíticos. Ha dirigido 28 tesis de licenciatura, 8 de maestría y 2 de doctorado. Recientemente incursiona en el área ambiental y donde aborda el problema de la generación de microplásticos.

Gabriel Balderas Romero

Coordinador del Depto. de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas (DIAU) de la BUAP.

Director del Proyecto Clima Urbano de Puebla DIAU-BUAP

Juan Pablo Báez Vásquez

Maestro en Ingeniería de Software, actualmente responsable de la Red Automática de Monitoreo Meteorológico (RAMM) de la BUAP participando en su instalación, mantenimiento y operación. Su trabajo se enfoca en el procesamiento de datos meteorológicos y climáticos con R y Python y el análisis espacial mediante QGIS. Desarrolla productos técnicos relacionados con proyecciones de cambio climático y soporte a investigaciones científicas

Sergio Martín Barreiro Zamorano

Licenciado en Biología por la Facultad de Biología de la Universidad Veracruzana, Especialidad en Ecología Acuática 1980-1985. Estudios de Posgrado Maestría en Ciencias Ambientales en el Área de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable del Instituto de Ciencias Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. De Investigación en Biodiversidad, Alimentación y Cambio Climático. Investigador del Centro de Investigación en Biodiversidad, Alimentación y Cambio Climático de Instituto de Ciencias de la BUAP.

Luis David Gómez Cortes

Lic. en Biología, actualmente cursa el posgrado en Ciencias Ambientales del Instituto de Ciencias de la BUAP. Interesado en Biología vegetal y el cuidado del medio ambiente a través del desarrollo sustentable. Con habilidades en taxonomía, sistemática, sistemas de información geográfica y microscopía.

José Antonio Moreno Razo

Profesor Titular C de Tiempo Completo del Departamento de Física de la UAM-I, miembro del SNII nivel II. Experto en simulaciones numéricas, computo científico.

Jorge Andrés Naranjo Vallejo

Pediatra y médico residente de segundo año del servicio de Alergia e Inmunología Clínica del Hospital Universitario de Puebla

Juan Jesús Ríos López

Médico especialista en Pediatría, Alergia e Inmunología Clínica del Hospital Universitario de Puebla.

Fidel Montoya Molina

Maestro en Ciencias (Física) por la UAM Iztapalapa. Su trabajo en el área de simulación computacional cubre áreas como cristales líquidos, sistemas dinámicos e inteligencia artificial.

Marco Antonio Herrera García

Doctorado en Ciencias Ambientales Universidad de Tlaxcala, actualmente director Gestión de Calidad del Aire, Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial. Se ha desempeñado como docente en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP.

Juan José Romero Cabrera

Estudiante de Bachillerato, CECyT 10 “Carlos Vallejo Márquez”, Instituto Politécnico Nacional, durante 2024 realizo trabajos de mediciones pedestres de partículas de aerosoles, con apoyo del programa Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico (delfín).

Ángel José González Pineda

Estudiante de la Licenciatura en Computación de la FCC de la BUAP, con interés en el área de computación en la nube y sistemas de la información. Siempre inquieto, ha logrado aprender cosas nuevas en el desarrollo de los dispositivos para medir las concentraciones de partículas de aerosoles.

Maribel Arroyo Carranza

Profesor-Investigador Centro de Química del ICUAP dirigiendo tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado. Perfil PRODEP y miembro del SNII. 42 publicaciones en revistas indexadas de Química y de divulgación. Coautora del libro “El Agua como un Recurso Natural Renovable” Editorial Trillas, 2015

Yedid Guadalupe Zambrano Medina

Doctora en Ciencias de la Información por la Facultad de Informática Culiacán. Profesora e investigadora en la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la UAS. Actualmente realiza una estancia posdoctoral en el Posgrado en Tecnologías Agrícolas Limpias de la Facultad de Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Luis Alberto Rendón

Técnico Académico de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP. Es responsable técnico del laboratorio de investigación en Interferometría y Holografía, donde se desarrollan líneas de investigación en formación de imágenes, interferometría, instrumentación óptica, Pticografía de Fourier, holografía digital y diseño de sistemas opto-mecatrónicos. Disfruta compartir el conocimiento, dirigir proyectos de tesis y desarrollar herramientas didácticas que conecten la teoría con la práctica en entornos académicos y científicos.

