

Los polvos y partículas del aire que respiramos

Julia G. **Cerón Bretón**
Rosa M. **Cerón Bretón**
Reyna C. **Lara Severino**

El crecimiento urbano y el desarrollo industrial en las grandes ciudades del mundo han dado como resultado mayores emisiones de contaminantes del aire, siendo este problema derivado de una mayor demanda de servicios, del incremento poblacional y de un mayor número de vehículos circulando. Esto ha provocado que la calidad del aire que respiramos se degrade cada vez más, convirtiéndose en un factor de riesgo para la salud de la población que habita estas ciudades (Aránguez *et al.*, 1999). Los contaminantes del aire pueden encontrarse en forma de gas o en forma de minúsculas partículas suspendidas que no son visibles al ojo humano, y que son emitidas por numerosas y diversas fuentes tales como los tubos de escape de los vehículos, los equipos de combustión y las chimeneas de las industrias. Estas partículas también pueden ser polvos resuspendidos de las carreteras y caminos, emisiones de la minería y de actividades siderúrgicas y metalúrgicas, entre otras. En este trabajo vamos a enfocarnos en el origen y contenido de estas partículas, así como en los riesgos que representan para la salud.

¿QUÉ SON LAS PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS Y QUE TAMAÑOS TIENEN?

Las partículas atmosféricas o material particulado denominado como PM (por sus siglas en inglés: *particulate*

matter), son sólidos o gotas de líquido suspendidos en el aire con diámetros comprendidos entre 0.002 y 100 μm (micrómetros) ($1\ \mu\text{m} = 0.001\ \text{mm}$ o $1 \times 10^{-6}\ \text{m}$) (Aragón-Piña, 2011). Su tamaño se define en función de su diámetro equivalente, ya que la mayoría de las partículas presentan formas irregulares, caracterizándose comúnmente en función de su diámetro aerodinámico (el cual se define como el diámetro de una esfera de densidad de $1\ \text{g/cm}^3$ que sedimenta con la misma velocidad final debido a la fuerza de la gravedad considerando aire en calma, medido usualmente en μm). Estas partículas son clasificadas en $\text{PM}_{2.5}$ y en PM_{10} si su tamaño es menor o igual a $10\ \mu\text{m}$, o menor o igual a $2.5\ \mu\text{m}$, respectivamente, siendo de particular interés porque tienen un tamaño tal que pueden ser inhaladas al momento de respirar, por lo que pueden llegar directamente a los pulmones y servir de vehículo a virus, bacterias, hongos, esporas y a una gran cantidad de sustancias químicas, algunas de las cuales pueden ser tóxicas.

¿CÓMO SE ORIGINAN ESTAS PARTÍCULAS?

Estas partículas pueden ser emitidas a partir de fuentes naturales o antropogénicas. Las fuentes naturales son aquellas que emiten contaminantes al aire sin la participación de actividades humanas e incluyen al polen, los hongos, los virus, las bacterias, las partículas resultantes de erupciones volcánicas o tormentas de arena, los aerosoles marinos, entre otras. Las fuentes antropogénicas se

refieren a actividades realizadas por el hombre, tales como la quema de combustibles fósiles (petróleo y sus derivados) y biomasa (leña o carbón), el uso de automóviles y actividades de tipo industrial, etcétera. Otra forma de clasificar a las partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ es de acuerdo con la forma en la cual son originadas pudiendo ser primarias, si se liberan directamente al aire a partir de una fuente de emisión como las anteriormente mencionadas, o secundarias, si se forman en la atmósfera a partir de reacciones químicas entre gases presentes en el aire, tales como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y amoníaco, a partir de las cuales se producen partículas de sulfatos y nitratos, así como partículas orgánicas secundarias.

La Figura 1 muestra las principales fuentes de partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$.



Figura 1. Fuentes de partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} de origen primario y secundario.

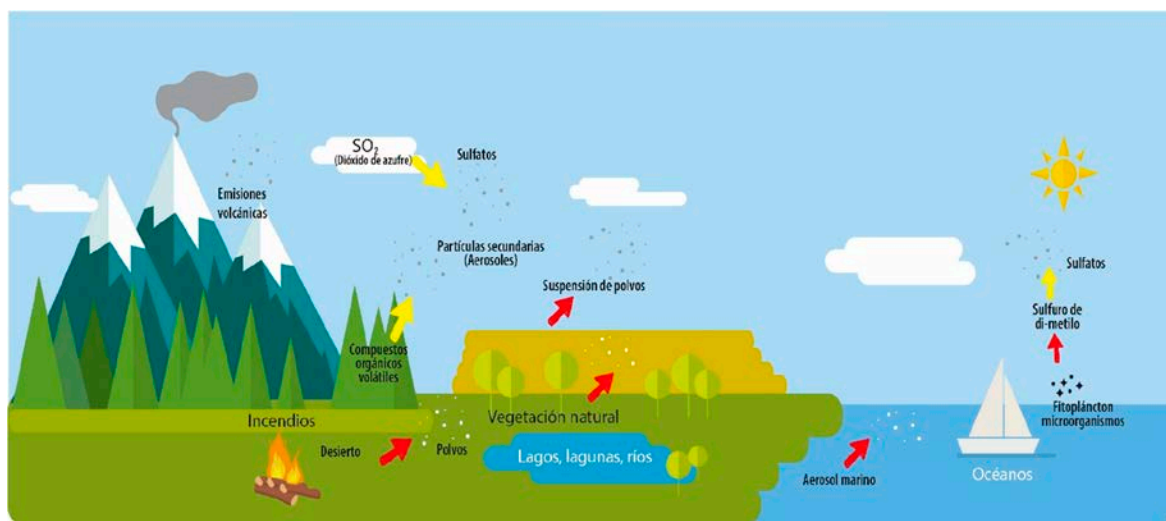


Figura 2. Principales procesos de formación de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$.

¿QUÉ CARACTERÍSTICAS TIENEN LAS PARTÍCULAS $\text{PM}_{2.5}$ Y PM_{10} ?

Las partículas $\text{PM}_{2.5}$ pueden resultar de procesos de condensación de gases, de procesos de sublimación inversa de gases, de reacciones químicas de gases presentes en el aire, y de procesos de disolución de gases en gotas de vapor de agua presentes en la atmósfera. Las partículas PM_{10} resultan de procesos de prensado, molienda, abrasión y de operaciones de reducción de tamaño, de evaporación de aerosoles atmosféricos, de suspensión de polvos de fuentes carreteras y no carreteras, y reacciones químicas de gases presentes en el aire (Rojano *et al.*, 2014). La Figura 2 muestra esquemáticamente algunos procesos de formación de las partículas atmosféricas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$.

Las partículas PM_{10} pueden ser emitidas por erupciones volcánicas, re-suspensión de polvos e incendios. Las partículas $\text{PM}_{2.5}$ (sulfatos) pueden formarse a partir de reacciones químicas de dióxido de azufre en presencia de humedad en el interior de nubes, así como también a partir de emisiones de sulfuro de dimetilo originado a partir de fitoplancton y microorganismos marinos. Por otro lado, también se pueden producir partículas secundarias (aerosoles) a partir de reacciones de partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ con compuestos orgánicos volátiles emitidos por la vegetación debido a estrés mecánico, hídrico o térmico.

Otra característica importante de las partículas es su tiempo de residencia en la atmósfera, el cual está determinado por su tamaño pues, según este, pueden sedimentar o permanecer suspendidas en el aire. Partículas con diámetros mayores a $20\ \mu\text{m}$ permanecen en suspensión durante algunos minutos u horas antes de sedimentar por gravedad, mientras que partículas más finas (con diámetros menores a $2.5\ \mu\text{m}$) pueden permanecer suspendidas durante días y hasta semanas antes de ser removidas por la acción de la lluvia (precipitación) o ser transportadas por acción del viento a zonas lejanas de sus fuentes de emisión. La abundancia en el aire de estas partículas se expresa en términos de su concentración másica, es decir, de la cantidad en masa de partículas (expresada en μg) en una unidad de volumen de aire (expresada en m^3). En dependencia de la temperatura y humedad del ambiente, las partículas pueden distribuir su masa en fase gas o en fase aerosol y, en correspondencia, sus concentraciones en el aire varían. Por ejemplo, si las partículas contienen sulfato de amonio o aerosoles orgánicos secundarios, su concentración puede incrementarse debido a cambios en la humedad y la temperatura que favorecen reacciones químicas de formación secundaria de partículas. Las partículas gruesas son insolubles y no higroscópicas

(es decir, no tienen la capacidad de retener agua), pueden ser eliminadas por gravedad y ser transportadas a cortas distancias por la acción del viento (a decenas de kilómetros a partir de su fuente de emisión). Las partículas finas son muy solubles e higroscópicas, suelen ser removidas del aire por la lluvia o por precipitación seca y, debido a su mayor tiempo de residencia, pueden ser transportadas de cientos, hasta miles de kilómetros, de su fuente de emisión. Otra propiedad importante de las partículas atmosféricas es su capacidad de absorber y dispersar la luz. En episodios de contaminación en las grandes ciudades, cuando se presentan altas concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, existe una mayor dispersión de la luz, reduciéndose de forma importante la visibilidad (es decir el alcance visual) (Moreno *et al.*, 2003), lo cual suele afectar la operación de aeropuertos y carreteras.

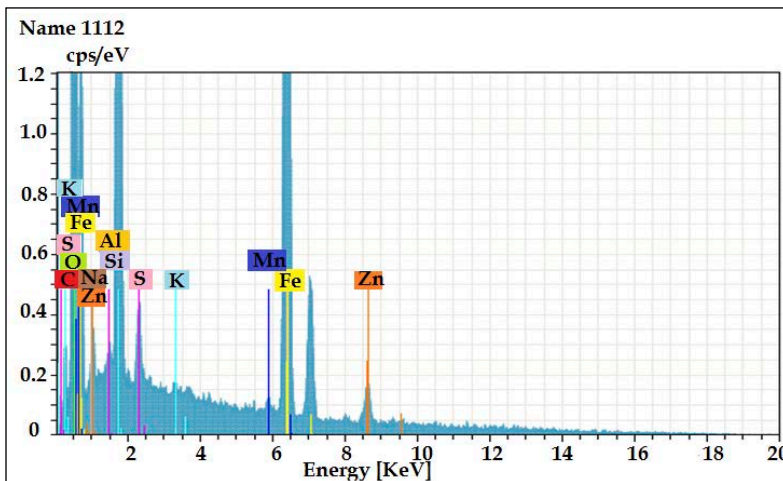
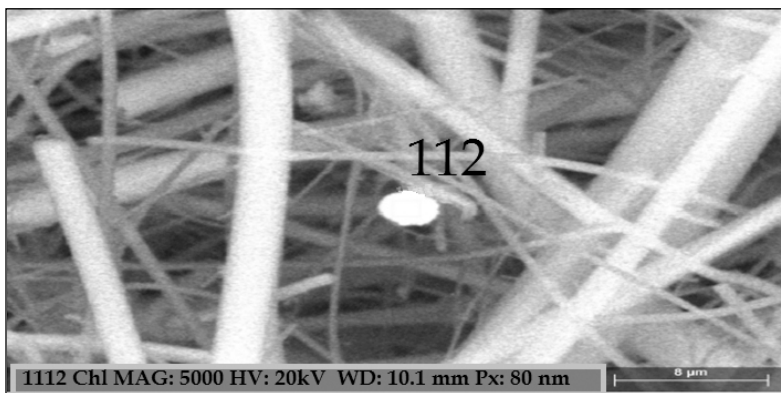


Figura 3. Imágenes que muestran la forma de partículas colectadas en a) León, Guanajuato (Partícula PM_{10} con una morfología brillante y de forma semicircular, con un contenido elemental de los siguientes elementos mayoritarios: hierro, silicio, oxígeno, aluminio, magnesio, carbono, zinc, potasio, sodio y azufre, originada por fundición y relacionada con la industria acerera) y b) Monterrey, Nuevo León (a) Partícula $PM_{2.5}$ brillante y de forma circular con aglomeraciones y con el siguiente contenido elemental: carbono, oxígeno, cobre, aluminio, silicio, azufre, calcio, potasio y bario, de origen antropogénico, asociada a emisiones vehiculares y procesos de combustión). Nota: El procesamiento de las muestras se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC) del Centro de Investigación en Corrosión (CICORR) de la Universidad Autónoma de Campeche (UAC).

¿CÓMO SE VEN Y QUÉ FORMA TIENEN

LAS PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS PM_{10} Y $PM_{2.5}$?

Se puede conocer la forma de las partículas mediante el uso de potentes microscopios que magnifican las imágenes de estas partículas hasta 500 veces o más (microscopios electrónicos de barrido), lo que permite identificar diversas formas de las partículas tales como esféricas, triangulares, elípticas, regulares, irregulares, etc., y que a simple vista o con el uso de microscopios convencionales menos potentes (microscopios ópticos) no sería posible observar (Aragón-Piña, 2011). En la Figura 3

se observan imágenes que muestran la forma de partículas colectadas en León, Guanajuato (PM_{10}) y en Monterrey, Nuevo León, ($PM_{2.5}$), analizadas mediante un microscopio electrónico de barrido acoplado a un equipo de espectroscopia de energías dispersivas (SEM-EDS), el cual permite, además, determinar la composición másica de elementos químicos presentes en las partículas analizadas.

¿CUÁL ES LA COMPOSICIÓN

DE LAS PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS?

Las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ están constituidas por elementos orgánicos e inorgánicos, algunos de los

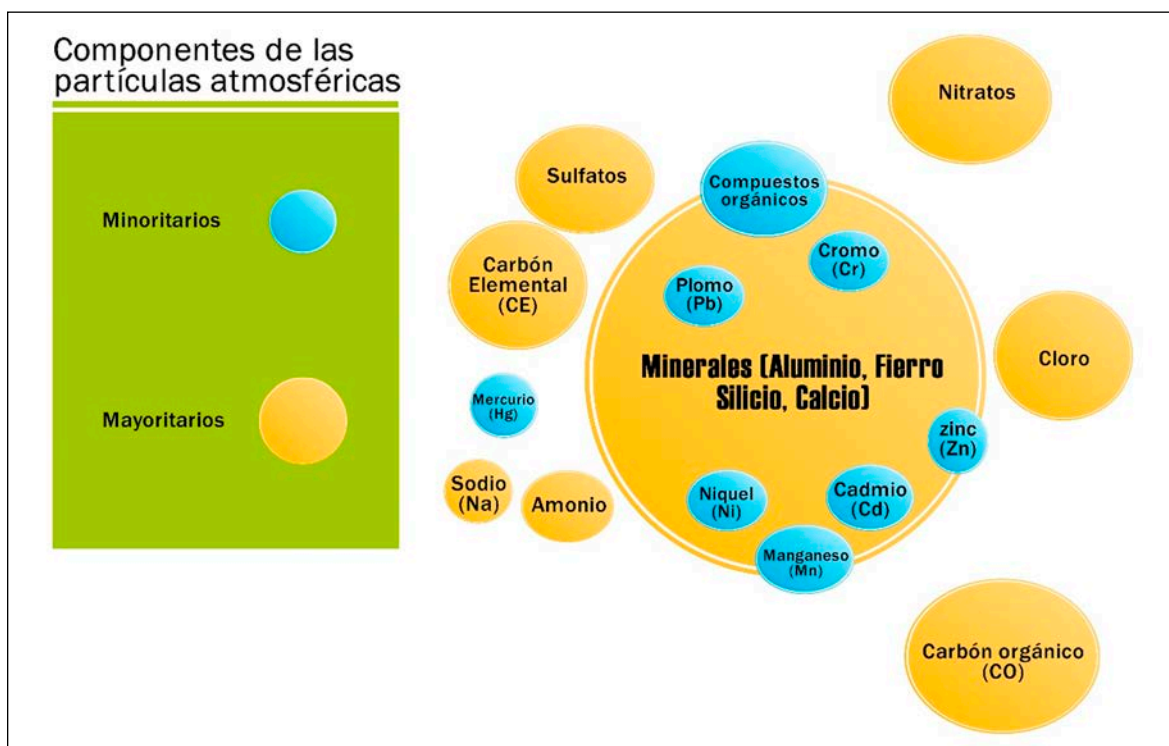


Figura 4. Compuestos y elementos mayoritarios y minoritarios presentes en las partículas atmosféricas. Fuente: elaboración propia basada en consulta de bibliografía (Aiken *et al.*, 2009; Cerón-Bretón *et al.*, 2019).

cuales pueden ser tóxicos. Los aerosoles marinos están formados por sales como el cloruro de sodio, mientras que las partículas provenientes de la corteza de la Tierra están formadas por hierro, titanio y aluminio. Los procesos de combustión que usan combustibles fósiles como el carbón generan partículas ricas en carbón, conteniendo trazas de hidrocarburos. Las fuentes móviles (vehículos a motor) emiten partículas con un alto contenido de carbón orgánico y elemental, así como pequeñas cantidades de metales y sulfatos.

El tipo de fuente define el contenido de las partículas; sin embargo, con base en numerosos estudios, se pueden definir compuestos y elementos mayoritarios y minoritarios presentes en las partículas atmosféricas (Aiken *et al.*, 2009; Cerón-Bretón *et al.*, 2019) (Figura 4).

Las fuentes de emisión de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ son diferentes y variadas, por lo que su contenido de elementos y compuestos químicos difiere también. Según algunos estudios llevados a cabo en diferentes partes del mundo (Romanazzi *et al.*, 2014; Cerón-Bretón *et al.*, 2019), el contenido usual

de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ es el que se muestra en la Figura 5.

EFFECTOS DE LAS PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS SOBRE LA SALUD HUMANA

La exposición a PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ocupa el quinto lugar en la lista de factores de riesgo de muertes prematuras en la población a nivel mundial (OMS, 2021), ocasionando 7 millones de muertes prematuras cada año. En niños, ocasiona una reducción del crecimiento y afectaciones en la función pulmonar, infecciones respiratorias y agravamiento de las condiciones en niños asmáticos. En adultos, sobre todo en personas de la tercera edad, la exposición a PM_{10} y $PM_{2.5}$ puede provocar problemas cardiovasculares e incluso puede causar la muerte. La exposición a $PM_{2.5}$ ha sido asociada al desarrollo de diabetes y enfermedades neurodegenerativas, al envejecimiento prematuro del tejido pulmonar, así como al desarrollo de cáncer

(Cohen *et al.*, 2019). La toxicidad de las partículas depende de su tamaño, morfología y composición química. PM₁₀ y PM_{2.5} pueden contener trazas de metales pesados (Bánfalvi, 2011), siendo estos uno de sus constituyentes más peligrosos debido a la toxicidad que poseen algunos de ellos. Se les denomina “metales pesados” debido a que tienen una densidad alta (mayor a 4 g/cm³), un peso atómico mayor a 20, y son tóxicos aún a muy bajas concentraciones. Algunos de estos elementos son: cobalto, cobre, fierro, manganeso, cadmio, plomo, arsénico y mercurio (Cohen *et al.*, 2019); todos ellos son absorbidos y se acumulan en tejido animal y humano. Otros efectos adversos de los metales pesados presentes en las partículas incluyen inflamación pulmonar, lesiones cardiovasculares y daño al sistema nervioso (OMS, 2021). Algunos metales pesados como arsénico, cadmio, cromo y níquel han sido clasificados por la Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer como carcinogénicos (IARC, 2012). Se ha reportado que la exposición a estos metales provoca un mal funcionamiento de genes supresores de tumores, y que afecta a los procesos de reparación de daños y actividades enzimáticas involucradas en el metabolismo a través del daño oxidativo (Bánfalvi, 2011). En México se regulan los límites máximos de las concentraciones máximas de PM₁₀ y PM_{2.5} permisibles en el aire ambiente, pero no se cuenta con regulaciones de las concentraciones de los componentes químicos que las constituyen. La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 establece que la concentración máxima de las partículas PM₁₀ no deben rebasar 70 µg/m³ (promedio de 24 horas) y 36 µg/m³ (promedio anual), mientras que las partículas PM_{2.5} no deben rebasar 41 µg/m³ (promedio de 24

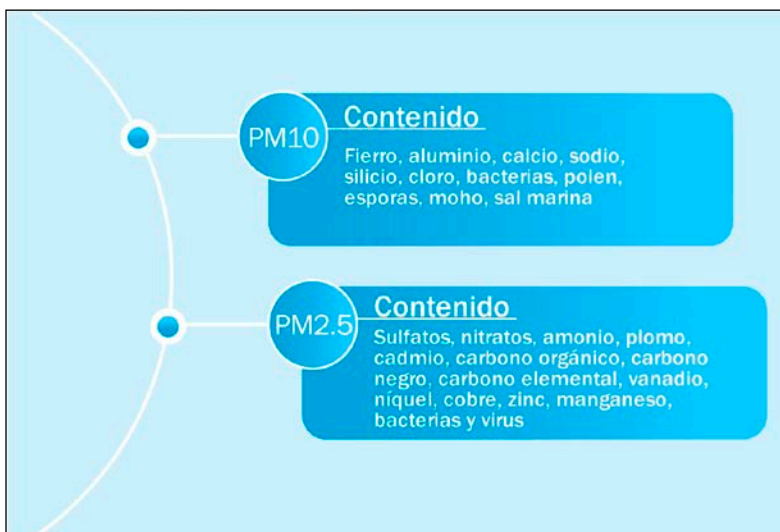


Figura 5. Principales componentes de las partículas atmosféricas PM₁₀ y PM_{2.5}. Fuente: elaboración propia con base en consulta de bibliografía (Romanazzi *et al.* 2014; Cerón-Bretón *et al.* 2019).

horas) y 10 µg/m³ (promedio anual), durante el año 2022 (se ha establecido una disminución gradual a 1, a 3 y a 5 años). Por lo anterior, resulta clave que se sumen esfuerzos para reducir las emisiones de estas partículas a la atmósfera, y que se establezcan políticas y regulaciones ambientales más estrictas, sobre todo en ciudades de nuestro país donde el crecimiento urbano e industrial ha incrementado en los últimos años y en donde la calidad del aire puede ser mala, por lo que la salud de la población expuesta está en riesgo.

R E F E R E N C I A S

- Aragón-Piña A (2011). ¿Cómo son las partículas atmosféricas antropogénicas y cuál es su relación con los diversos tipos de fuentes contaminantes? (1era. edición) México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Metalurgia-Facultad de Ingeniería San Luis Potosí, S. L. P. Editorial Groppe Libros.
- Aiken AC, Salcedo D, Cubison MJ, Huffman JA, DeCarlo PF, Ulbrich IM, Docherty KS, Sueper D, Kimmel JR, Worsnop DR, Trimborn A, Northway M, Stone EA, Schauer JJ, Volkamer RM, Fortner E, de Foy B, Wang J, Laskin A, Shutthanandan V, Zheng J, Zhang R, Gaffney J, Marley NA, Paredes-Miranda G, Arnott WP, Molina LT, Sosa G and Jimenez JL (2009). Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0)-Part 1: Fine particle composition and organic source apportionment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(17):6633-6653. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6633-2009>.



© Enrique Soto. Serie "Mofles", 2006.

Aránguez E, Ordóñez JM, Serrano J, Aragonés N, Fernández-Patier R, Gandarillas A and Galán I (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública* 73(2):123-132. https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf.

Bánfalvi (2011). Heavy Metals, Trace Elements and Their Cellular Effects. En: Bánfalvi (Ed.). *Cellular Effects of Heavy Metals* (pp. 3–28). Springer, New York. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0428-2_1.

Cerón-Bretón JG, Cerón-Bretón RM, Espinosa Guzmán AA, Guarnaccia C, Martínez Morales S, Lara Severino RC, Rangel Marrón M, Hernández López G, Carranco Lozada SE, Kahl JDW, Pech Pech IE, Ramírez Lara E and Espinosa Fuentes ML (2019). Trace Metal Content and Health Risk Assessment of PM₁₀ in an Urban Environment of León, Mexico. *Atmosphere* 10(10):573-582. <https://doi.org/10.3390/atmos10100573>.

Cohen SM, Boobis AR, Dellarco VL, Doe JE, Fenner-Crisp PA, Moretto A, Pastoor TP, Schoeny RS, Seed JG, and Wolf DC (2019). Chemical carcinogenicity revisited 3: Risk assessment of carcinogenic potential based on the current state of knowledge of carcinogenesis in humans. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 103:100-105. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.01.017>.

IARC (2012) Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to human. 100C. Lyon: International Agency for Research on Cancer; ISSN: 1017-1606. <https://monographs.iarc.who.int/>.

Moreno T, Gibbons W, Jones T and Richards R (2003). The geology of ambient aerosols: characterizing urban and rural/coastal silicate PM_{10-2.5} y PM_{2.5} using high-volume cascade collection and scanning electron microscopy. *Atmospheric Environment* 37(30):4265-4276. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00534-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00534-X).

NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0.

Organización Mundial de la Salud (OMS) 2021. Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>.

Rojano R, Arregoces H and Restrepo G (2014). Composición Elemental y Fuentes de Origen de Partículas Respirables (PM₁₀) y Partículas Suspendidas Totales (PST) en el Área Urbana de la Ciudad de Riohacha, Colombia. *Información tecnológica* 25(6):3-12. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000600002>.

Romanazzi V, Casazza M, Malandrino M, Maurino V, Piano A, Schilirò, T and Gilli G (2014). PM₁₀ size distribution of metals and environmental-sanitary risk analysis in the city of Torino. *Chemosphere* 112:210-216. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.034>.

Julia G. Cerón Bretón
Rosa M. Cerón Bretón
Reyna C. Lara Severino
Universidad Autónoma del Carmen
jceron@pampano.unacar.mx



© Enrique Soto. Serie "Mofles", 2007.