

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LAS PARTÍCULAS PM_{2.5} PRESENTES EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE GUANAJUATO

PHYSICOCHEMICAL ANALYSIS OF PM_{2.5} PARTICLES IN THE AIR OF GUANAJUATO CITY

Anaely Monserrat Pérez Ramos¹, Mario Alberto Barajas Rivera², Luis Alfredo Rodríguez Hernández³, Claudia Cecilia Ramírez Ramírez⁴, Karla Denisse Acosta Álvarez⁵, Adrián Zamorategui Molina⁶, Saúl Villalobos Pérez⁷.

am.perezramos@ugto.mx¹, ma.barajasrivera@ugto.mx², la.rodriguez@ugto.mx³, cc.ramirezramirez@ugto.mx⁴, kd.acostaalvarez@ugto.mx⁵, zamorategui@ugto.mx⁶, s.villalobos@ugto.mx⁷

^{1,2}División de Ingenierías; Campus Guanajuato; Universidad de Guanajuato

Resumen

La contaminación del aire es el principal riesgo para la salud pública. Entre los contaminantes, las partículas finas menores a 2.5 µm (PM_{2.5}) han sido objeto estudio por su mayor impacto en la salud debido a su composición química y morfología. Se realizó un monitoreo continuo de la concentración de PM_{2.5} en el centro de la ciudad de Guanajuato y se muestrearon partículas PM_{2.5} durante 24 horas en tres puntos de la ciudad. Se analizaron las características fisicoquímicas de las partículas PM_{2.5} usando la microscopía electrónica de barrido (SEM/EDS). Los promedios anuales de concentraciones de PM_{2.5} excedieron los límites máximos permitidos (12 µg/m³). Los promedios mensuales de concentración de PM_{2.5} muestran, picos máximos en mayo y mínimos en septiembre. El efecto de lavado de la atmósfera por la precipitación sobre las PM_{2.5} se observó durante los meses de junio a agosto al reducir la concentración. El análisis SEM-EDS reveló la presencia de elementos como carbono, oxígeno, flúor, silicio, aluminio, azufre, potasio y calcio en las partículas. Se observaron variaciones en la composición elemental entre los sitios de muestreo, con concentraciones notables de silicio y aluminio en el centro de la ciudad, y altos niveles de azufre en la zona sur, posiblemente debido a la industria ladrillera cercana.

Palabras clave: PM_{2.5}, análisis fisicoquímico, morfología, SEM-EDS, variables meteorológicas.

Introducción

Actualmente la contaminación atmosférica es uno de los mayores desafíos ambientales y de salud pública, especialmente en entornos urbanos poblados. La contaminación del aire se origina tanto de fuentes naturales como antropogénicas, incluyendo la emisión de gases, vapores, partículas líquidas o sólidas, y la presencia de microorganismos patógenos en el aire. (Ubilla & Yohanneseen, 2017). Estos contaminantes pueden contribuir a la incidencia de enfermedades respiratorias y gastrointestinales, afectando especialmente a grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con sistemas inmunológicos comprometidos (Cruz Orjuela & Jiménez Pallares, 2006). En diversas ciudades del mundo la concentración de PM_{2.5} exceden los niveles de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Como se ha reportado en Nueva Delhi, Beijing, Ciudad de México, Los Ángeles, Londres, Lahore, Hotan, a pesar de las acciones implementadas y regulaciones, la contaminación por PM_{2.5} todavía representa un riesgo.

En relación con el material particulado, las partículas finas menores a 2.5 µm (PM_{2.5}) han sido objeto estudio por su impacto en la salud humana y el medio ambiente. Estas partículas, con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 µm, forman parte de la fracción fina de las partículas suspendidas totales (PST) (Manzanares et al., 2011). Pueden ser emitidas directamente a la atmósfera (primarias) o formarse en ella a partir de precursores gaseosos (secundarias) (World Health Organization, 2013). Su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio, alcanzar los alvéolos pulmonares e incluso ingresar al torrente sanguíneo las convierte en un riesgo significativo para la salud cardiovascular y respiratoria (Ulloa Ninahumán et al., 2022). El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) ha reportado que esta contaminación por partículas en el aire puede tener diversos efectos negativos en el medio ambiente. Entre estos se incluyen fenómenos como la precipitación ácida, la reducción de la visibilidad atmosférica,

alteraciones en el equilibrio energético relacionado con el cambio climático, y el proceso de eutrofización en ecosistemas acuáticos, entre otros impactos ambientales (SEMARNAT, 2021).

La composición química y morfología de las $PM_{2.5}$ depende de las fuentes que las generan como los incendios, emisiones volcánicas, industria y vehículos. Así, las características fisicoquímicas nos dan información sobre la fuente generadora. En este tipo de partículas se han encontrado elementos tóxicos como el As, Pb, Hg, Cd, Zn, Cr, Cu, Al, Fe, K, Cl, S, Si, Ca, C, F, entre otros. La presencia de Cr, Cd, Ni, Pb y Fe en las partículas se asocia a fuentes vehiculares. (Parra & Vargas, 2010).

El potasio se origina de múltiples fuentes, incluyendo sal marina, actividades culinarias, polvo, combustión de carbón, humo de leña, incineración de residuos, construcción, demolición, fuegos artificiales y producción de hierro y acero (Yu et al., 2018; Pachon et al., 2013). El cloro es emitido principalmente por la industria cementera, fabricación de PVC, y otros procesos industriales como la producción de pulpa y papel, químicos orgánicos, pesticidas y productos farmacéuticos (del Cid Ruíz, 2018; Gourbe, 2007; Pascal, 2016). La quema de combustibles fósiles en centrales eléctricas, refinerías y vehículos es la principal fuente de azufre en las $PM_{2.5}$ (Blumberg et al., 2003; Wisconsin Department of Health Services, 2022). El aluminio proviene de la producción industrial, incluyendo la construcción, la industria automotriz y aeronáutica, así como de la combustión de carbón e incineración (Delgado et al., 2015; ATSDR, s.f.). El silicio se origina de cenizas volantes, arenas, arcillas y la producción de silicio metálico (De Jesús, 2020; Sævarsdottir et al., 2021), mientras que el calcio se encuentra en el suelo, agua dura y cemento sin fraguar (Arica Chenche, 2021; Pionce Pibaque, 2014). El hierro es emitido por la industria siderúrgica, fundiciones, y la combustión de diversos combustibles (Pérez Fadul & Hernández Hernández, 2006; Wang et al., 2015; Almanza, 2008). El carbono en las $PM_{2.5}$ proviene de la combustión de combustibles fósiles, biomasa y biocombustibles (Arjona Vegas, 2021). Finalmente, el titanio se utiliza en aleaciones metálicas y en la industria aeroespacial (Pavón Fuentes, 2007).

La diversidad de fuentes y los elementos que emiten contribuye a la compleja composición de las $PM_{2.5}$, haciendo que su estudio sea crucial para comprender su impacto en la calidad del aire y la salud pública. La variedad de orígenes de estos elementos subraya la necesidad de un enfoque integral en la gestión de la calidad del aire, abordando múltiples sectores industriales y actividades humanas (Timoteo Cornejo, G. C. H., 2022).

México ha implementado varias normativas y políticas para tratar de reducir la contaminación por $PM_{2.5}$. La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 establece el límite máximo permisible promedio anual de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y límite máximo permisible promedio 24 horas para el primer año a partir de que entró en vigor esta norma en 2021 de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el segundo y cuarto año, de $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y a partir del quinto año de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de partículas $PM_{2.5}$ en el aire ambiente, con el objetivo de proteger la salud de la población. (Diario Oficial de la Federación, 2021)

Estudios de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el INECC reportaron que varias ciudades del estado de Guanajuato, como León y Salamanca, superan con frecuencia los estándares de calidad del aire establecidos en la NOM-025-SSA1-2021 (SEMARNAT, 2021).

Por otro lado, la presencia de las $PM_{2.5}$ podría estar influenciada por fenómenos atmosféricos, como la humedad relativa, la precipitación, variación de temperatura y el viento. La humedad relativa tiene la posibilidad de influenciar de manera directa en los equipos que se usan como principio de medida la dispersión de luz (Circle, 2022). Además, a mayor humedad relativa, las $PM_{2.5}$ pueden absorber agua y crecer, de forma que se facilita su deposición y se reduce su concentración. Durante los meses fríos, las concentraciones de las $PM_{2.5}$ tienden a ser más altas debido a que la mayor estabilidad atmosférica durante el invierno reduce la dispersión de las partículas en la atmósfera, (Motocanche, 2020). En climas cálidos, la mayor radiación solar intensifica las reacciones fotoquímicas en la atmósfera, pueden transformar los gases precursores emitidos por las fuentes antropogénicas y naturales en partículas secundarias, aumentando por la concentración de las $PM_{2.5}$. Por lo tanto, aunque los mecanismos son diferentes, tanto los climas fríos como los cálidos pueden influir en las concentraciones de $PM_{2.5}$ a través de procesos específicos de cada estación, (Motocanche, 2020).

Para realizar el análisis fisicoquímico y morfología de las partículas $PM_{2.5}$, se han aplicado diversas técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). El SEM es una técnica de análisis que examina la topografía, estructura y composición de diversos materiales. Este método utiliza un haz de

electrones de alta energía para escanear la superficie de la muestra. Aunque se suele decir que el SEM "toma una imagen", lo que hace detectar la respuesta del material al impacto de los electrones primarios, en vez de registrar fotones como en la microscopía óptica. Los detectores del equipo captan las diversas señales generadas por esta interacción, proporcionando información detallada sobre las características físicas y químicas del material estudiado (Clavijo, 2013).

Metodología

El monitoreo de la concentración de las partículas $PM_{2.5}$ se realizó de forma continua en la zona centro de la ciudad de Guanajuato ubicado en las siguientes coordenadas $21^{\circ}01'04''N$ $101^{\circ}15'26''W$, identificando el lugar como el punto uno de muestreo (P1). El muestreo se realizó con una estación semifija que cuenta con un equipo de monitoreo por atenuación beta (BAM) el cual es aprobado por la agencia ambiental de Estados Unidos (EPA). Este monitoreo se realizó cada durante todos los días del año. Además, se fijaron dos puntos más para realizar dos muestreos de partículas con un equipo portátil (BGI PQ200 Ambient Air Particulate Sampler), en el que se utilizaron filtros de teflón de 47 mm de diámetro. Estos muestreos se realizaron durante los meses de abril y mayo del presente año. La figura 1, muestra los puntos de muestreo seleccionados. El segundo punto de muestreo se colocó en la colonia de Dos Ríos con coordenadas $21^{\circ}01'22''N$ $101^{\circ}15'32''W$, el tercer punto de muestreo se colocó en la parte sur de la ciudad en la colonia Cúpulas ubicado en las siguientes coordenadas $20^{\circ}58'39''N$ $101^{\circ}16'37''W$.

Se realizó el análisis morfológico y físico químico de las partículas $PM_{2.5}$ usando la microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplado a la técnica espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) para determinar la composición y forma de las partículas. Se recopiló información de los parámetros meteorológicos en la ciudad de Guanajuato para analizar su comportamiento con respecto a la concentración de las partículas $PM_{2.5}$. La estación meteorológica de referencia se encuentra en el Observatorio Meteorológico de la Universidad de Guanajuato en las siguientes coordenadas $21^{\circ}00'53''N$ $101^{\circ}15'58''W$. Se graficaron los resultados para su análisis y discusión.



Figura 1. Puntos de muestreo de partículas $PM_{2.5}$ de la ciudad de Guanajuato

Resultados y discusión

La variación de los promedios de la concentración anual de partículas $PM_{2.5}$ durante el periodo 2022 – 2024 se muestra en la figura 2. Se observa que en 2023 se registró la mayor concentración ($13.32 \mu g/m^3$) por arriba del límite máximo permisible establecido en la NOM-025-SSA1-2021, en comparación con la registrada en el 2022 ($11.45 \mu g/m^3$) y ligeramente mayor que la observada en el primer semestre de 2024 ($13.07 \mu g/m^3$), lo anterior se puede atribuir a la gran cantidad de partículas $pm_{2.5}$ emitidas a la atmosfera durante el incendio que se desarrolló del primero al cinco de mayo en el tiradero municipal ubicado en la comunidad de

Nochebuena, los vientos del oeste dispersaron las partículas en dirección del este, donde se encuentra el centro de la ciudad de Guanajuato (García, 2023).

En 2024 se muestra una concentración alta en comparación a 2022, esto se debe a que los primeros meses del año es en los cuales se registra mayor concentración de $PM_{2.5}$ disminuyendo a partir de julio (Figura 3).

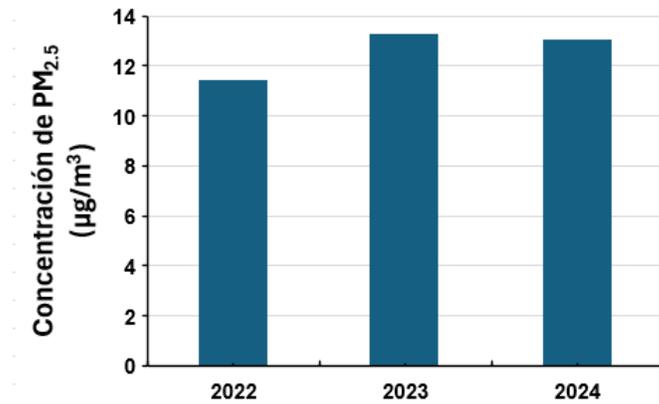


Figura 2: Variación de la concentración anual de partículas $PM_{2.5}$ durante el periodo 2022 - 2024.

En el periodo 2022- 2024 se presenta un patrón estacional, con picos en primavera, específicamente en mayo. Este comportamiento puede estar relacionado con la temporada de incendios forestales alrededor de la ciudad principalmente, pero existen otras variantes que se relacionan con estos altos valores como puede ser las quemas agrícolas, condiciones meteorológicas, tráfico vehicular. Mientras que los picos de concentración son consistentes en mayo, las fluctuaciones en los meses posteriores varían entre los años. A partir del mes de junio las concentraciones de $PM_{2.5}$ disminuyen debido a la llegada de lluvias, ya que al inicio de las lluvias se lleva cabo ciertos fenómenos que hacen que esto suceda que son el lavado atmosférico, aumento de humedad, reducción de fuentes de emisión y hay una mejora de la Dispersión atmosférica. El descenso en los meses de verano es más marcado en 2023 y 2024 en comparación con 2022. En los meses de agosto y septiembre los niveles de $PM_{2.5}$ suelen volver a aumentar debido a diferentes factores ambientales y antropogénicos. En primer lugar, está la reducción de la intensidad y frecuencia de las lluvias al final del verano. Además, la transición de verano a otoño también puede favorecer la acumulación de contaminantes, ya que, la temperatura comienza a bajar y los vientos pueden volverse más débiles, lo que limita la dispersión de partículas en la atmosfera, creando así una capa de inversión térmica.

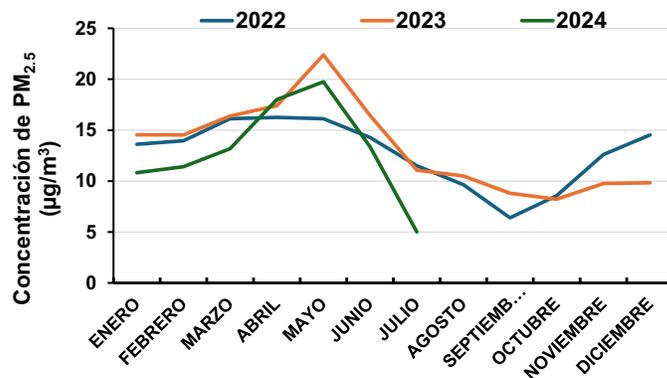


Figura 3: Variación de la concentración mensual de partículas $PM_{2.5}$ durante el periodo 2022 - 2024.

Variables meteorológicas Ene-Jun 2024

Se realizó un análisis de la variación de la concentración de $PM_{2.5}$ en relación con las variables meteorológicas: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación durante los meses de enero a junio de 2024. Los promedios mensuales de la temperatura muestran un aumento de enero a mayo, con una ligera disminución en junio. Este resultado coincide con otros estudios realizados en el Estado de Guanajuato, que reportan mayo como el mes más cálido del año por la primavera. La ligera disminución de temperatura en junio se puede atribuir a las lluvias registradas durante este periodo. La temperatura media aumenta constantemente desde enero, con un valor de $15.99^{\circ}C$, alcanzando su punto máximo en mayo con $26.29^{\circ}C$, antes de descender ligeramente en junio a $23.31^{\circ}C$. Esta tendencia refleja el comportamiento estacional típico de las temperaturas en la región estudiada.

La humedad relativa presenta una relación inversa con la temperatura del aire, disminuyendo de enero a mayo (67.83% en enero, 64.74% en febrero, y 65.62% en marzo), con un incremento ligero en junio debido a las lluvias. En los primeros tres meses del año, la humedad es alta, con valores de 67.83% en enero, 64.74% en febrero y 65.62% en marzo. Sin embargo, en abril y mayo, la humedad disminuye drásticamente a 26.47% y 24.98% , respectivamente, antes de aumentar nuevamente en junio a 51.73% . Esta notable variación de la humedad relativa puede influir en la formación y dispersión de aerosoles en la atmósfera, lo que se interpreta como un incremento en la concentración de $PM_{2.5}$.

En cuanto a la precipitación, no se registraron valores de enero a mayo, pero en junio se alcanzaron 25.23 mm, lo que generó una disminución en la concentración de $PM_{2.5}$ por el efecto de lavado de la atmósfera y el arrastre de partículas debido a la lluvia. La precipitación actúa como un mecanismo de "lavado húmedo", donde las gotas de lluvia capturan y eliminan las partículas contaminantes del aire, mejorando la calidad del aire (Tellez Peña J. S., 2020).

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ muestran una tendencia ascendente desde enero, con un valor inicial de $10.82 \mu g/m^3$, alcanzando su máximo en mayo con $19.74 \mu g/m^3$. Posteriormente, en junio, las concentraciones disminuyen a $13.37 \mu g/m^3$. Este patrón sugiere que las temperaturas más altas y la menor humedad en mayo pueden favorecer la formación y acumulación de $PM_{2.5}$.

La velocidad del viento se mantiene relativamente constante durante los primeros tres meses, con valores cercanos a 2.10 km/h. En abril, se observa un aumento significativo a 6.079 km/h, seguido de una ligera disminución en mayo a 5.48 km/h y en junio a 5.3 km/h. Se ha reportado que al aumentar la velocidad del viento disminuye la concentración de $PM_{2.5}$, observándose este efecto en los meses de abril y mayo al disminuir la velocidad del viento en mayo y aumentando la concentración de $PM_{2.5}$.

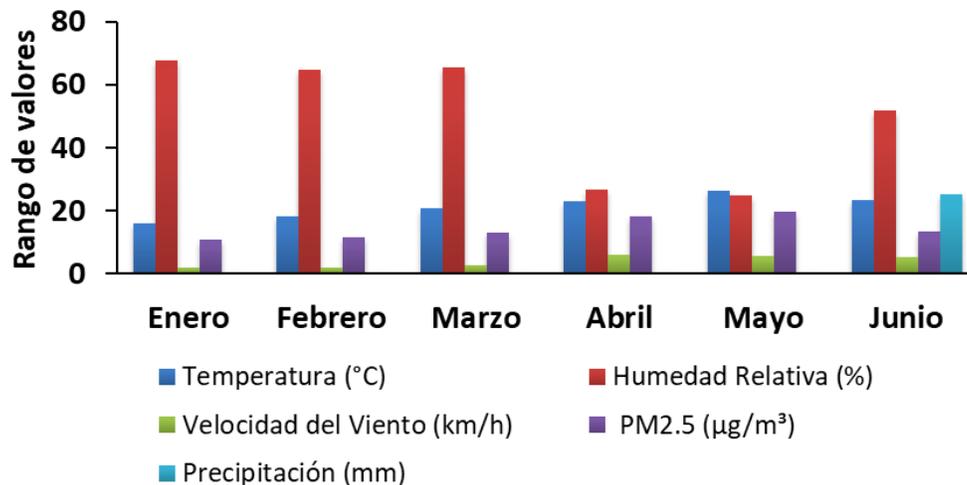


Figura 5. Variación de la concentración de $PM_{2.5}$ y variables meteorológicas en los meses de Ene-Jun 2024.

Análisis fisicoquímico SEM-EDS de las PM_{2.5}

En la Figura 6 A, B y C se muestran las partículas capturadas en los filtros de teflón colocados en los puntos de muestreo, ubicados en P1, P2 y P3 respectivamente. Como se puede ver las partículas de los puntos 1 y 2 presentan formas esféricas e irregulares. Por otro lado, las partículas del punto 3 presentan morfología irregular en su mayoría. En todos los casos las partículas se encuentran en aglomerados de partículas de PM_{2.5}, observándose partículas menores a 1 micra depositadas de forma dispersa sobre la superficie del filtro.

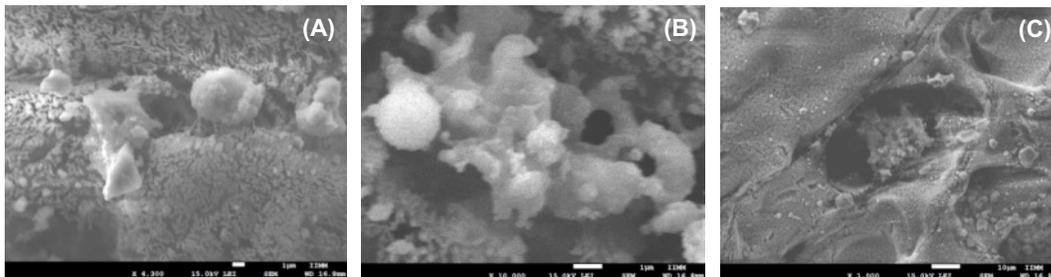


Figura 6. Micrografía EDS de las partículas PM_{2.5} correspondientes a los puntos de muestreo: (A) P1, (B) P2 y (C) P3.

El análisis de la composición elemental realizada por microscopía electrónica de barrido SEM-EDS de las partículas PM_{2.5} recolectadas en tres puntos de muestreo de la ciudad de Guanajuato (Zona centro P1, Dos Ríos P2 y Zona Sur P3) se muestran en la figura 7 A, B y C. Como se observa en los espectros EDS de las partículas de los tres puntos de muestreo, los elementos que mayoritariamente se encontraron fueron carbono, y flúor. Las altas concentraciones de estos elementos se atribuyen principalmente a la composición del filtro en el que se recolectaron las muestras de PM_{2.5} el cual está compuesto de carbono y flúor (CF₂=CF₂).

Se encontraron otros elementos en cantidades significativas como oxígeno, silicio, aluminio, azufre, potasio y calcio (Figura 7). El oxígeno en las PM_{2.5} puede deberse a la presencia de aerosoles en la atmósfera y a otras fuentes que contribuyen a su composición. Estas fuentes incluyen compuestos orgánicos provenientes de emisiones vehiculares, quema de biomasa y procesos industriales; sulfatos y nitratos formados por oxidación atmosférica; óxidos metálicos de origen natural y antropogénico; aerosoles secundarios formados por reacciones químicas atmosféricas; absorción de vapor de agua; y procesos de oxidación atmosférica. (Ahmad et al., 2021). La presencia de oxígeno en las partículas se puede atribuir a que forma parte de los óxidos de los elementos presentados, como el óxido de aluminio y óxido de calcio, y además puede considerarse la aportación del oxígeno presente en la cámara del microscopio donde se hizo el análisis elemental (Feliu Jr, S., 2010).

La presencia del silicio en estas partículas puede atribuirse a dos fuentes principales. En primer lugar, podría provenir de cenizas resultantes de la quema de carbón y humo de leña, posiblemente asociada a establecimientos locales como rosticerías y panaderías en la zona centro de la ciudad. El silicio también podría tener un origen derivado de partículas de suelo ricas en arcillas y arenas, que han sido resuspendidas por acción del viento. Igualmente, el aluminio tiene fuentes similares generadoras a las del silicio, por lo que su presencia podría estar relacionada con los procesos de combustión de carbón mencionados. En base a la morfología predominantemente irregular de las partículas y los agregados de PM_{2.5}, se puede mencionar que su fuente principal son los procesos de combustión (Franco Pineda, D. A., 2020), además de la resuspensión de partículas.

El azufre encontrado en las partículas PM_{2.5} podría tener su origen por la quema de combustibles fósiles principalmente. Sin embargo, en el P3 se detectó una mayor concentración (18.86%) comparado con el P1 (3.13%) y P2 (3.71%) (Tabla 1). Lo cual puede atribuirse a cercanía con la zona ladrillera de la comunidad de Yerbabuena. La industria ladrillera es conocida por contribuir significativamente a la contaminación por azufre debido al tipo de combustible que se utiliza para la cocción de ladrillo, como son combustóleo, aceites gastados, madera, leña, diésel, principalmente. Así, durante el proceso de cocción de ladrillos las altas temperaturas provocan la liberación de azufre presente naturalmente en las arcillas y combustibles utilizados en la producción (Puerto Mora, R., 2022).

El potasio se origina de múltiples fuentes, incluyendo el polvo, combustión de carbón, humo de leña, incineración de residuos, construcción, demolición, fuegos artificiales y producción de hierro y acero (Yu et al., 2018; Pachon et al., 2013). Debido a que el P2 se encuentra en una zona cerca de pollerías, el potasio encontrado se le atribuye a la combustión por carbón, ya que los asadores de estos negocios utilizan el carbón como fuente de combustible (Ortega Espín, A. R., 2008). Por otro lado, la presencia de calcio en el P3, aunque en menor concentración (4.92%), se puede atribuir a partículas resuspendidas del suelo de la zona (Arica Chenche, 2021; Pionce Pibaque, 2014). Ya que el P3 se encuentra en la zona sur de la ciudad colindando con cerros y zonas poco urbanizadas en comparación con el P1 y P2, que se encuentran ubicados en la zona centro de la ciudad donde no se registró la presencia de calcio.

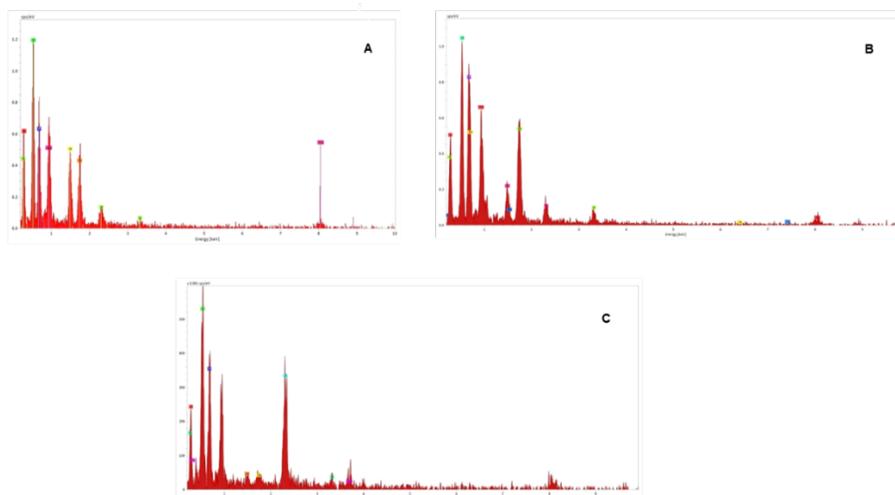


Figura 7. Espectros EDS del análisis elemental de las partículas $PM_{2.5}$ correspondientes a los puntos de muestreo (A) P1, (B) P2 y (C) P3.

Las concentraciones de los elementos encontrados en las partículas $PM_{2.5}$ correspondientes a los puntos de muestreo P1, P2 y P3 se muestran en la tabla 1. Los elementos que se encontraron en mayor concentración por arriba del 10% en los tres puntos fueron el carbono, oxígeno y flúor. En menores concentraciones se encontraron el silicio y el azufre en los tres puntos, y el aluminio en P1 y P2. El potasio se encontró solamente en el P2 con 3.07%, y el calcio se encontró únicamente en el P3 con 4.92%.

Tabla 1. Concentración de los elementos en las partículas capturadas en los puntos de muestreo

Elemento	At. No.	P1	P2	P3
		Mass Norm. (%)	Mass Norm. (%)	Mass Norm. (%)
Carbono	6	23,81	18,76	17,37
Oxígeno	8	33,10	29,47	35,13
Flúor	9	21,39	28,22	22,24
Aluminio	13	8,63	4,55	/
Silicio	14	9,95	12,22	1,49
Azufre	16	3,13	3,71	18,86
Potasio	19	/	3,07	/
Calcio	20	/	/	1,59
		100	100	100

Conclusiones

Posterior al análisis físico químico de las partículas de $PM_{2.5}$ podemos concluir que, a partir de junio, las concentraciones de $PM_{2.5}$ disminuyen hasta un 60% debido a la llegada de lluvias, las cuales provocan fenómenos como el lavado atmosférico, o el aumento de la humedad relativa. Sin embargo, en los meses de octubre y noviembre, los niveles de $PM_{2.5}$ suelen volver a aumentar debido a la reducción de la intensidad y frecuencia de las lluvias al final del verano. La transición de verano a otoño también puede favorecer la acumulación de contaminantes debido a la disminución de las temperaturas y los vientos más débiles, lo que limita la dispersión de partículas.

Por lo anterior, se observó que las condiciones meteorológicas tienen un impacto directo en la calidad del aire, específicamente en las concentraciones de $PM_{2.5}$. Las temperaturas más altas, la menor humedad relativa y la baja velocidad del viento tienen una relación directa con el aumento de $PM_{2.5}$, mientras que la precipitación y los vientos más fuertes ayudan a disminuir la concentración de las $PM_{2.5}$ en la atmósfera, favoreciendo la calidad del aire.

Las partículas $PM_{2.5}$ analizadas en los tres puntos de muestreo de la ciudad de Guanajuato presentan morfología y composición distintas, reflejando la influencia de las actividades específicas de cada zona. Las partículas capturadas en los puntos P1 y P2, ubicados en la zona centro, muestran similitudes en su morfología, presentando formas esféricas e irregulares y formando aglomerados. En contraste, las partículas del punto P3, situado en una zona semi urbanizada cercana a una zona ladrillera, exhiben una morfología irregular, diferenciándose notablemente de las encontradas en el centro de la ciudad. Esta distinción sugiere una influencia significativa de las actividades industriales locales en la composición del material particulado.

La mayor concentración de azufre (18.86%) en el punto P3, en comparación con P1 (3.13%) y P2 (3.71%) se puede atribuir principalmente a la proximidad de P3 a la zona ladrillera de la comunidad de Yerbabuena, donde el uso de combustibles como combustóleo, aceites usados y diésel en la cocción de ladrillos contribuye significativamente a la emisión de compuestos de azufre. En el centro de la ciudad, la presencia de potasio en P2 se asocia probablemente con la combustión de carbón en los establecimientos de pollos asados, ilustrando cómo las actividades comerciales locales pueden influir en la composición de las partículas.

Estos resultados subrayan la importancia de considerar las fuentes locales de emisión en la gestión de la calidad del aire, ya que las características de las partículas $PM_{2.5}$ varían significativamente según la ubicación y las actividades predominantes en cada zona de la ciudad.

Bibliografía/Referencias

- Almanza, V. (2008). Estudio de las partículas en suspensión y metales pesados asociados en el sector Carvajal, Kennedy. Universidad de La Salle.
- Ahmad, M., Yu, Q., Chen, J., Cheng, S., Qin, W., & Zhang, Y. (2021). Chemical characteristics, oxidative potential, and sources of $PM_{2.5}$ in wintertime in Lahore and Peshawar, Pakistan. *Journal Of Environmental Sciences/Journal Of Environmental Sciences*, 102, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.09.014>
- Arica Chenche, L. J. (2021). Evaluación de la contaminación del aire por material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la zona céntrica de la ciudad de Guayaquil. Universidad de Guayaquil.
- Arjona Vegas, A. (2021). Análisis de la contaminación atmosférica por material particulado y carbono negro en un entorno urbano. Universidad de Sevilla.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (s.f.). Aluminio - ToxFAQs™.
- Blumberg, K. O., Walsh, M. P., & Pera, C. (2003). Low-sulfur gasoline & diesel: the key to lower vehicle emissions. The International Council on Clean Transportation (ICCT).
- Clavijo, J. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 3(3).

- Cruz Orjuela, A., & Jiménez Pallares, A. (2006). Evaluación de la contaminación del aire por microorganismos oportunistas y su relación con material particulado (PM2.5 y PM10) en la localidad de Puente Aranda. Universidad de La Salle.
- De Jesús, A. (2020). Evaluación de la concentración de silicio en el material particulado PM10 y PM2.5 en zonas mineras del departamento de La Guajira. Universidad de La Guajira.
- del Cid Ruíz, M. A. (2018). Determinación de cloro en el material particulado PM2.5 en la atmósfera de la Ciudad de Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Delgado, J. F., Rojas, J. P., Duarte, A., & Ramirez, L. E. (2015). Caracterización del material particulado en dos vías de transporte público colectivo y masivo en Bogotá. Universidad de La Salle.
- Feliu Jr, S. (2010). Caracterización química de nanosuperficies. introducción a la espectroscopia fotoelectronica de rayos x (xps).
- Franco Pineda, D. A. (2020). Análisis y caracterización del material particulado PM10 y PM2. 5 en la ciudad de Manizales.
- Fuge, R. (2019). Fluorine in the environment, a review of its sources and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 100, 393-406.
- Gacio, D. G. (2013). Caracterización química de la fracción orgánica de la materia particulada atmosférica (PM10 y PM2.5) en entornos urbano, industrial y suburbano. Universidade da Coruña.
- González Díez, Y., Gordo Odériz, E., & García Cambero, J. (1998). Factores de emisión de flúor en la industria cerámica. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 37(6), 455-460.
- Gourbe, M. (2007). Industria del papel y pasta de papel. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo.
- Labrada-Delgado, G., Aragon-Pina, A., Campos-Ramos, A., Castro-Romero, T., Amador-Munoz, O., & Villalobos-Pietrini, R. (2012). Chemical and morphological characterization of PM2.5 collected during MILAGRO campaign using scanning electron microscopy. *Atmospheric Pollution Research*, 3(3), 289-300.
- Manzanares, E., Vega, H., Salas, P., Hernández, E., Salcedo, D., & Belmont, R. (2011). Caracterización morfológica y química de partículas atmosféricas PM2.5 por microscopía electrónica de barrido en el área metropolitana de Monterrey, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(4), 337-346.
- Ortega Espín, A. R. (2008). Diseño del sistema de extracción de gases para un asador de pollos (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2008).
- Pachon, J. E., Weber, R. J., Zhang, X., Mulholland, J. A., & Russell, A. G. (2013). Revising the use of potassium (K) in the source apportionment of PM2.5. *Atmospheric Pollution Research*, 4(1), 14-21.
- Parra, A. Q., Vargas, M. J. Q., & Martínez, J. A. H. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM2. 5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua: revista de la facultad de Ciencias Basicas*, 8(1), 1-20.
- Pascal, G. (2016). La industria del papel y de la pasta de papel. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo.
- Pavón Fuentes, N. (2007). Evaluación de la concentración de titanio en el material particulado PM10 en Santiago de Chile. Universidad de Chile.
- Pérez Fadul, L. M., & Hernández Hernández, L. C. (2006). Determinación de metales pesados en partículas respirables e identificación de fuentes de emisión, a partir de un muestreo atmosférico en la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá. Universidad de La Salle.
- Pionce Pibaque, W. A. (2014). Determinación de partículas en suspensión PM10 y PM2.5 en la ciudad de Jipijapa. Universidad Estatal del Sur de Manabí.
- Puerto Mora, R. (2022). Análisis espacial de la dispersión del contaminante atmosférico dióxido de azufre emitido por la fabricación de ladrillos en la vereda de Patio Bonito, municipio de Nemocón, Cundinamarca-Colombia.
- Sævarsdóttir, G., Bakken, J. A., & Hernández, V. R. (2021). Greenhouse gas emissions from silicon production. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52(1), 36-48.

- Secretaría De Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT). (2021). Partículas suspendidas PM10 y PM2.5 dañan salud y medio ambiente. gov.mx. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/particulas-suspendidas-pm10-y-pm2-5-danan-salud-y-medio-ambiente#:~:text=Esa%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20por%20part%C3%ADculas,y%20la%20eutrofizaci%C3%B3n%2C%20entre%20otros>.
- Tellez Peña, J. S. (2020). Propuesta para evaluar un sistema de separación de PM10 que permita el control de emisiones atmosféricas contaminantes en el proceso de prevención ambiental de hornos intermitentes de la industria ladrillera de Bogotá.
- Timoteo Cornejo, G. C. H. (2022). Revisión sistemática. Líquenes epífitos como bioindicadores eficientes y adaptables de la calidad del aire.
- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111-118.
- Ulloa Ninahuamán, J., Alvarez-Tolentino, D., Peña Rojas, A., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM2.5) de una ciudad altoandina. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(3), 199-207.
- Wang, Y., Hopke, P. K., Xia, X., Rattigan, O. V., Chalupa, D. C., & Utell, M. J. (2015). Source apportionment of airborne particulate matter using inorganic and organic species as tracers. *Atmospheric Environment*, 103, 251-261.
- Wisconsin Department of Health Services. (2022). Sulfur Dioxide.
- World Health Organization. (2013). Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia.
- Yu, S., Liu, W., Xu, Y., Yi, K., Zhou, M., Tao, S., & Liu, W. (2018). Characteristics and oxidative potential of atmospheric PM2.5 in Beijing: Source apportionment and seasonal variation. *Science of The Total Environment*, 650, 277-287.
- García, F. (2023, 28 diciembre). ¿Qué ha pasado con el basurero de Guanajuato Capital tras incendio? *Periódico Correo*.