

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO

División de Ciencias Biológicas y de la Salud

Licenciatura en Química Farmacéutica Biológica

Informe de servicio social:

**“Importancia de las partículas de aerosol en la microfísica de
nubes en el sur de la Ciudad de México”**

Presenta:

Hernández Valdés Karla Lizbeth

2183028240

Febrero de 2023

**Realizado del 09 de mayo del 2022 al 14 de diciembre de 2022 en
la Universidad Nacional Autónoma de México**

Asesor interno



Dr. Alejandro Azaola Espinosa

Asesor externo

Harry Alvarez Ospina

Dr. Harry Alvarez Ospina

Importancia de las partículas de aerosol en la microfísica de nubes en el sur de la Ciudad de México

Introducción

El aire está compuesto de gases, partículas sólidas y líquidas. Dentro de las gaseosas se destacan los compuestos SO_2 , NO_2 , CO , CO_2 y compuestos orgánicos volátiles, mientras que a las partículas sólidas o líquidas se les conoce como material particulado (PM) y su composición química es muy variada. Estos últimos han llamado la atención en los últimos años, y dependiendo de su tamaño aerodinámico, el PM se clasifica como PM_{10} o fracción gruesa, y como $\text{PM}_{2.5}$ o partículas finas (Falcon-Rodriguez *et al.*, 2017; Nazarenko *et al.*, 2021). Estas partículas son consideradas un indicador importante de la calidad del aire en un área determinada y, con frecuencia, están asociadas con fuentes naturales así como con fuentes antropogénicas (Espinosa *et al.*, 2019).

Las fuentes naturales incluyen el rocío marino, las erupciones volcánicas, los incendios forestales, la erosión geológica y las fuentes aerobiológicas, como la caspa animal, los ácaros, el polen, las bacterias y los virus, entre otros. Las emisiones de fuentes antropogénicas urbanas son principalmente emisiones de actividades industriales y transporte urbano, siendo las emisiones de vehículos la principal fuente de contaminación del aire, producto de la combustión de gasolina y diésel. El resultado final de las emisiones de estos contaminantes naturales y antropogénicos es la reducción de la calidad del aire, el deterioro de la salud pública, alteración de los ecosistemas naturales, del ciclo hidrológico y del clima de la Tierra. (Cabrera-Segoviano *et al.*, 2022; Nemmar *et al.*, 2013).

En los últimos 20 años se ha estudiado la contaminación en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), con el objetivo de disminuir los niveles de concentración de ciertos contaminantes que se encuentran suspendidos en la atmósfera. Sin embargo, debido a que la zona geográfica en donde se encuentra esta rodeada de montañas se favorece la acumulación de los contaminantes debido a la escasa circulación de vientos y la dispersión de dichos contaminantes. Así mismo, el continuo desarrollo demográfico e industrial ha obligado a la metrópoli a extender sus fronteras hasta los límites de las áreas ecológicas protegidas, resultando en un incremento del deterioro de la calidad del aire (Hidalgo-Reyes, 2016).

Durante la última década, el gobierno mexicano ha logrado avances significativos en la mejora de la calidad del aire. Sin embargo, a pesar de este importante logro, los residentes de la ZMVM siguen expuestos a concentraciones altas de

contaminantes transportados principalmente por el aire que exceden los estándares de calidad del aire ambiental, especialmente PM y ozono, los dos contaminantes más importantes desde el punto de vista de la salud pública (Molina *et al.*, 2010).

A pesar de la importancia de las partículas de aerosol en el sistema climático, existen grandes incertidumbres a cuanto a su interacción con la formación de nubes y el desarrollo de precipitaciones, ambos eventos influenciados por un grupo de partículas de aerosol, conocidas como partículas nucleantes de hielo (INP, por sus siglas en inglés) (Cabrera-Segoviano *et al.*, 2022).

Los INP promueven la formación de hielo en las nubes, lo que influye directamente en el desarrollo de precipitaciones y el ciclo hidrológico. El predominio de la formación de precipitaciones sobre los continentes a través de la fase de hielo hace fundamental la presencia de partículas de hielo, especialmente en nubes de fase mixta, donde la congelación por inmersión ha sido reportada como la principal vía de formación de hielo (Pereira *et al.*, 2022).

Existe una gran variedad de partículas de aerosol capaces de actuar como INP entre los que se pueden encontrar el polvo mineral, partículas biológicas, carbón negro, aerosol orgánico secundario y sales cristalinas. Comprender el papel que juegan las partículas de aerosoles urbanos en la formación de nubes es de gran importancia, ya que las áreas urbanas y sus emisiones asociadas seguirán creciendo debido a la migración de personas de áreas rurales a urbanas (Cabrera-Segoviano *et al.*, 2022).

Entre febrero de 2018 a mayo de 2019, Cabrera-Segoviano y colaboradores estudiaron la variabilidad interanual de partículas de aerosol emitidas en la Ciudad de México, durante las estaciones seca-cálida, que tienen la capacidad de actuar como INP por medio de la técnica de congelación por inmersión. A partir de este estudio se concluyó que las partículas de aerosol emitidas pueden actuar como INP a temperaturas inferiores a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ con concentraciones de que oscilan entre 0.74 L^{-1} ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) y 20.42 L^{-1} ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Así mismo, se encontró que los INP a temperaturas superiores a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aumentaron durante un episodio de contaminación severa. Dado que tales temperaturas cálidas de nucleación del hielo pueden vincularse con la presencia de partículas biológicas.

Objetivos

Objetivo general

Realizar la caracterización química (composición elemental e iones inorgánicos solubles en agua) de las partículas $\text{PM}_{2.5}$ al sur de la Ciudad de México mediante el empleo de diversas técnicas analíticas (Fluorescencia de Rayos X y Cromatografía de Intercambio Iónico) y evaluar su capacidad para actuar como INP.

Objetivos específicos

- Recolectar muestras de partículas de aerosol en el sur de la Ciudad de México durante 7 días para su posterior análisis.
- Caracterizar la composición elemental y iones inorgánicos solubles en agua de las partículas de aerosol recolectadas en el sur de la Ciudad de México.
- Evaluar la capacidad que tienen las partículas de aerosol recolectadas en el sur de la Ciudad de México para actuar como INP y formar cristales de hielo.

Métodología

Diseño experimental y sitio de muestreo

Durante el período comprendido del 12 al 21 de mayo del 2022, se realizó una campaña de medición de contaminantes atmosféricos en la azotea del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), mismo que se encuentra ubicado en la zona suroeste de la Ciudad de México, en las coordenadas de latitud 19.3262° N, longitud 99.1761° W. Este sitio de muestreo está caracterizado principalmente por estar rodeado de edificios académicos así como de áreas verdes, como la Reserva del Pedregal de San Ángel que se encuentra ubicada a 1.4 km de la estación. Además de que se caracteriza por tener un bajo flujo vehicular y constante de autobuses y/o autos particulares. Sin embargo, a 650 m se localiza la Avenida Antonio Delfín Madrigal donde de manera constante hay tránsito de vehículos, camiones pesados y motocicletas (Hidalgo-Reyes, 2016; Vega-Aguilar, 2022).

Periodo de muestreo

Las muestras PM_{2.5} de aerosol atmosférico fueron recolectadas en filtros de cuarzo y teflón haciendo uso de impactadores MiniVol (AirMetrics) con cabezales de 2.5 µm durante periodos de muestreo de 24 horas de lunes a viernes desde las 8:00 a.m. hasta las 8:00 a.m. del siguiente día, realizando un total de 7 muestreos con los impactadores MiniVol.

Así mismo, se realizó la recolección de aerosol atmosférico haciendo uso de un impactador de cascada MOUDI (Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor, por sus siglas en inglés), durante periodos de muestreo de 4 horas aproximadamente, de lunes a viernes del día 12 al 20 de mayo del 2022, dentro de esta campaña de muestreo se realizó un muestreo de 24 horas durante el periodo del día 17 de mayo al 18 de mayo, realizando un total de 10 muestreos con el impactador MOUDI.

Equipos de muestreo

- **Impactador MiniVol**

El MiniVol TAS (Tactical Air Sampler, Airmetrics) es un equipo portátil empleado para realizar muestreos de material particulado atmosférico. Este equipo funciona como una bomba de succión, controlada por un temporizador programable, que puede configurarse para realizar ciclos de muestreo de 24 horas o hasta de una semana.

En este equipo, el aire muestreado pasa por un cabezal PM2.5, en el cual las partículas mayores a 2.5 micras chocan con un plato de impactación ubicado en la parte inferior del fragmentador, mientras que las menores o iguales a 2.5 micras siguen las líneas de flujo y son depositadas sobre un sustrato, de teflón o de cuarzo, según sea el caso (Hidalgo-Reyes, 2016).

- **MOUDI**

Este equipo consta de ocho etapas para separar partículas en función de su diámetro aerodinámico (tamaños de corte de 0.18, 0.32, 0.56, 1.0, 1.8, 3.2, 5.6 y 10.0 μm). En este equipo, cada etapa posee un plato de impactación, sobre el cual se coloca un sustrato de aluminio, y son asegurados o fijados mediante imanes impidiendo que se muevan durante el muestreo. Adicionalmente al equipo se le adapta una bomba de vacío externa, la cual permite tomar una muestra de aire de la atmosfera continuamente con un flujo constante, para asegurar que las partículas de aerosol puedan ser colectadas a bajas velocidades de flujo y a su vez evitar caídas excesivas de presión (Alvarez-Ospina, 2009; Córdoba *et al.*, 2021).

Calibración del equipo

Se llevó a cabo la calibración de los impactadores MiniVol antes de realizar los muestreos, haciendo uso del calibrador de flujo de aire Gilian Gilibrator. La tasas de flujo volumétrico usadas fueron de 5.0 ± 0.1 L/min.

Tratamiento de los filtros

A los filtros de teflón y cuarzo utilizados en los MiniVol durante la campaña de muestreo se le realizó un tratamiento previo a su uso, con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de impurezas que pudieran contener y así, evitar errores en los análisis químicos a realizar posteriormente.

- Filtros de teflón

Para el tratamiento de los filtros de teflón se llevó a cabo un lavado, tanto de los filtros como de las cajas Petri en los que serían depositados los filtros, con agua desionizada.

Posteriormente, los filtros y las cajas Petri se llevaron a secar en la campana de flujo laminar durante 3 horas aproximadamente. Una vez secos los filtros se colocaron en las cajas petri secas y se cerraron. Luego, fueron numerados cada uno de los filtros y se pesó cada uno de los filtros con ayuda de una balanza analítica. Se registró su peso inicial. Finalmente, se sellaron nuevamente las cajas Petri con parafilm.

- Filtros de cuarzo

Para el tratamiento de los filtros de cuarzo, fueron colocados dentro de capsulas de porcelana un aproximado de 6 filtros por capsula. Posteriormente se llevaron a una mufla para realizar el acondicionamiento de los filtros a 500°C durante 6 horas aproximadamente.

Una vez finalizado el tiempo de acondicionamiento de los filtros, se dejó enfriar la mufla para poder extraer las capsulas que contenían los filtros y con ayuda de una pinza, colocar cada uno de los filtros dentro de una cada Petri que fue sellada con parafilm y enumeradas para la identificación de los filtros.

Finalmente, cada uno de los filtros fue pesado con ayuda de una balanza analítica y se registró el peso inicial de cada uno de los filtros. Una vez registrados los pesos de todos los filtros, se sellaron nuevamente las cajas Petri con parafilm.

Datos de contaminantes atmosféricos

Las variables de contaminantes atmosféricos como O₃, CO, SO₂, NO, NO₂, NO_x, PM_{2.5}, se obtuvieron de la Red Automática De Monitoreo Atmosférico (RAMA), instalada en la UNAM. La obtención de estos datos fue con la finalidad de plantear comparaciones entre los datos obtenidos de las mediciones realizadas durante la campaña de muestro y los datos obtenidos por la RAMA, en caso necesario.

Datos meteorológicos

Las variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, radiación, dirección y velocidad del viento se obtuvieron de la estación meteorológica de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), instalada en la UNAM.

Resultados y discusión

Análisis gravimétrico de los filtros

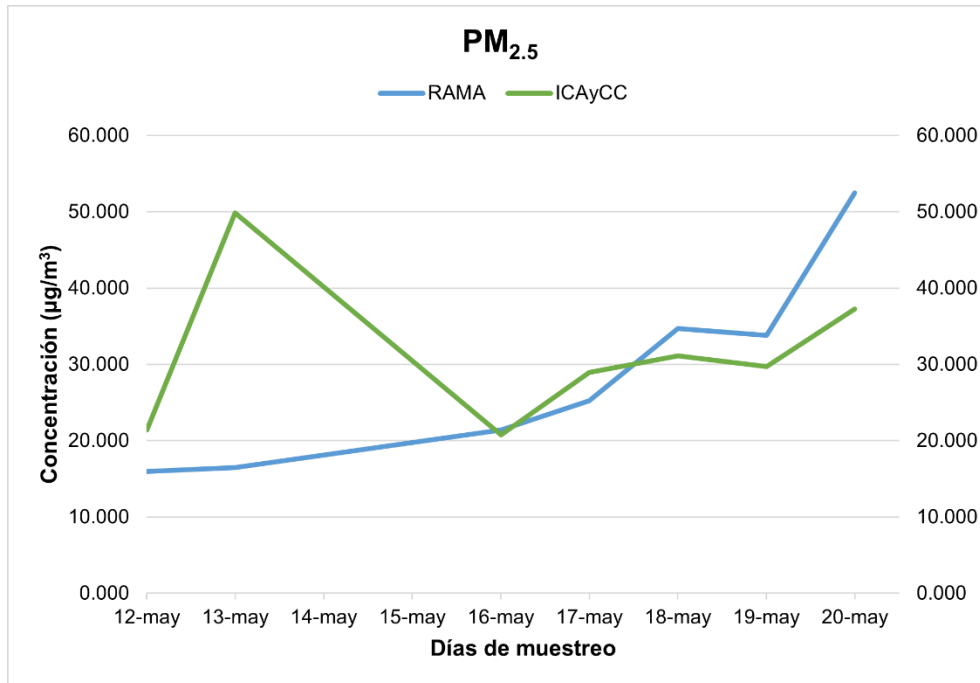
Se llevó a cabo la determinación de la concentración de PM_{2.5} [C] a partir de las muestras obtenidas en los filtros de teflón durante el periodo de muestreo. Para esto se consideró el peso de los filtros (antes y después de cada muestro), el flujo de alimentación de aire y el tiempo de funcionamiento del equipo (Ecuación 1). Los resultados obtenidos fueron registrados en la Tabla 1.

$$[C] = \frac{\text{Peso final del filtro} - \text{Peso inicial del filtro}}{\text{Flujo MiniVol} \times \text{Tiempo de funcionamiento}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Tabla 1. Concentración de PM_{2.5}

Fecha	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	[C] (µg/m ³)
12/05/2022	182.58	182.73	21.416
13/05/2022	183.01	183.37	49.894
16/05/2022	187.04	187.19	20.789
17/05/2022	185.95	186.16	28.983
18/05/2022	184.53	184.76	31.096
19/05/2022	184.44	184.65	29.727
20/05/2022	180.47	180.74	37.264

Posteriormente, se realizó la comparación de los datos registrados en la Tabla 1 y los datos registrados por la RAMA para la determinación de PM_{2.5} durante el periodo de muestreo previamente establecido, los resultados se muestran en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Serie de tiempo de las partículas $PM_{2.5}$ durante la campaña de muestreo

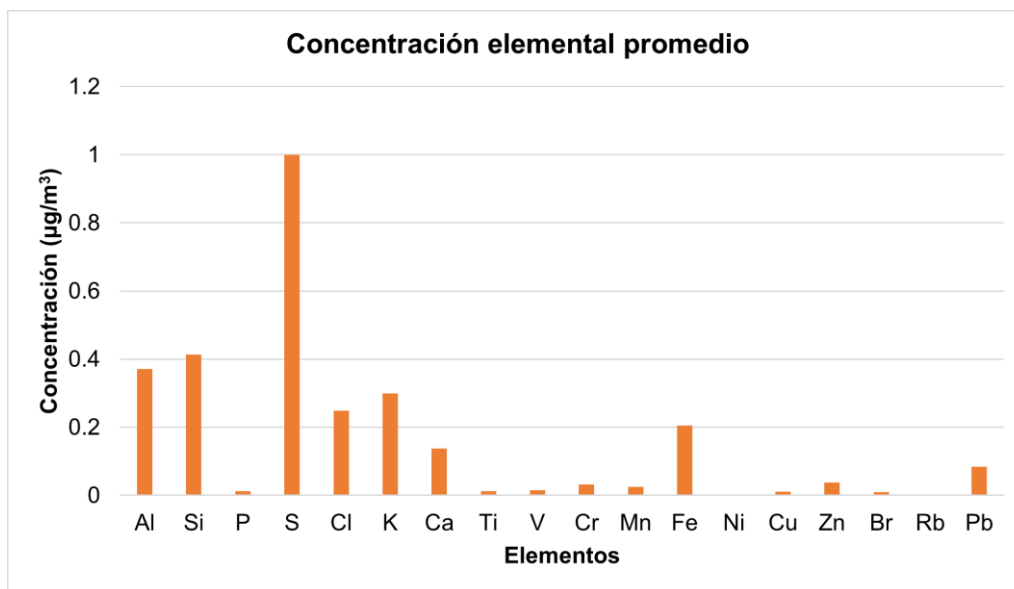
Las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas por gravimetría (ICAyCC), muestran una buena correlación con la mayoría de los datos obtenidos reportados por los sensores automáticos de la RAMA. Así mismo, durante la campaña de muestreo no se observó la ocurrencia de algún evento que sugiera el aumento de concentración de $PM_{2.5}$, tales como alguna contingencia o quema de biomasa.

Análisis de fluorescencia de rayos X

Los análisis XRF se realizaron con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF) desarrollado para aplicaciones ambientales en el Instituto de Física de la UNAM (IFUNAM) para determinar la concentración de elementos presentes en las muestras obtenidas (Hernandez-López *et al.*, 2016).

La muestra se irradia de manera puntal, es decir, se excitan todos los elementos presentes en la muestra al mismo tiempo en un mismo punto. Los fotones emitidos son captados por el detector que recolecta la radiación incidente de la muestra y separa las energías características de cada elemento. El detector en un espectrómetro de XRF produce un pulso eléctrico cuando capta la señal de un fotón de rayos X. La altura del pulso emitido es proporcional a la energía del fotón. Los cuales son amplificados y se cuentan en un analizador multicanal para formar un espectro. El detector de estado sólido es uno de los más usados para XRF. Este tipo de detectores pueden fácilmente determinar elementos desde sodio hasta uranio (Reynoso-Cruces, 2022).

Una vez obtenidos los resultados de XRF, se llevó a cabo el cálculo de la concentración elemental contenida en las muestras obtenidas para posteriormente graficar la concentración elemental promedio (Gráfica 2).



Gráfica 2. Concentración elemental promedio determinada por la técnica de XRF.

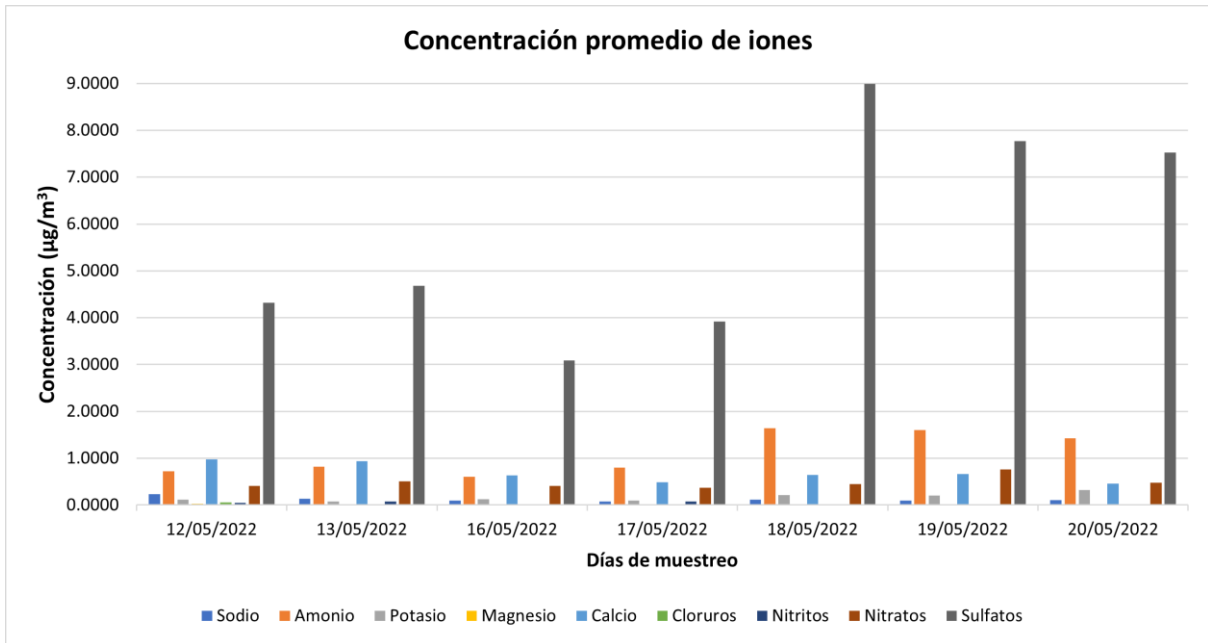
La composición química elemental del aerosol atmosférico recolectado en el periodo de muestreo y analizado por la técnica de XRF, muestra como elementos predominantes al S, Al, Si, Cl, K y Fe que provienen principalmente de fuentes antropogénicas (como emisiones originadas por vehículos empleados en transporte y la resuspensión de polvo de las calles pavimentadas, entre otras).

Cromatografía de intercambio iónico

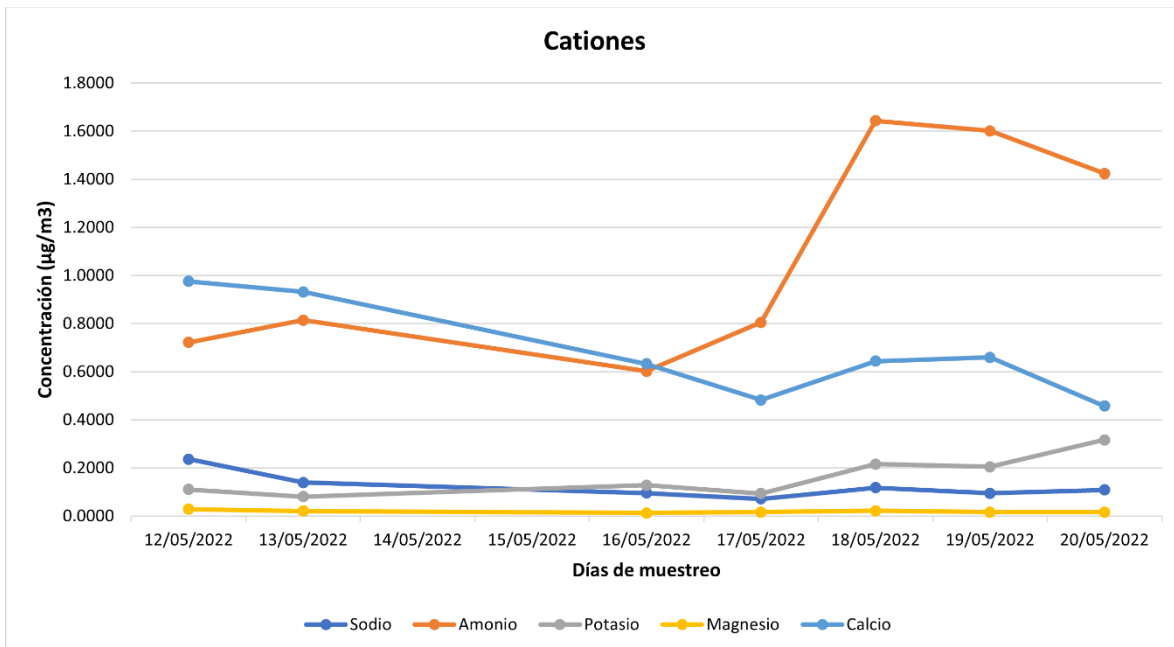
La cromatografía de intercambio iónico es un método de medida cualitativo y cuantitativo, basado en la separación de los diferentes iones; contiene una determinada disolución y los hace pasar a través de una columna de intercambio de iones para medir la señal en los diferentes tiempos de respuesta característicos de cada ion. La separación de los iones tiene lugar gracias al proceso de intercambio iónico entre la fase móvil y los grupos de cambio enlazados covalentemente a la fase estacionaria. La fase estacionaria es típicamente una resina de baja capacidad con un grupo funcional que posee una carga fija y un contraión que la hace eléctricamente neutra (Izquierdo *et al.*, 2009).

En la Gráfica 3 se muestra el comportamiento de la concentración promedio de los todos los iones determinados por cromatografía de intercambio iónico. Posteriormente, en la Gráfica 4 se muestran los cationes determinados para esta

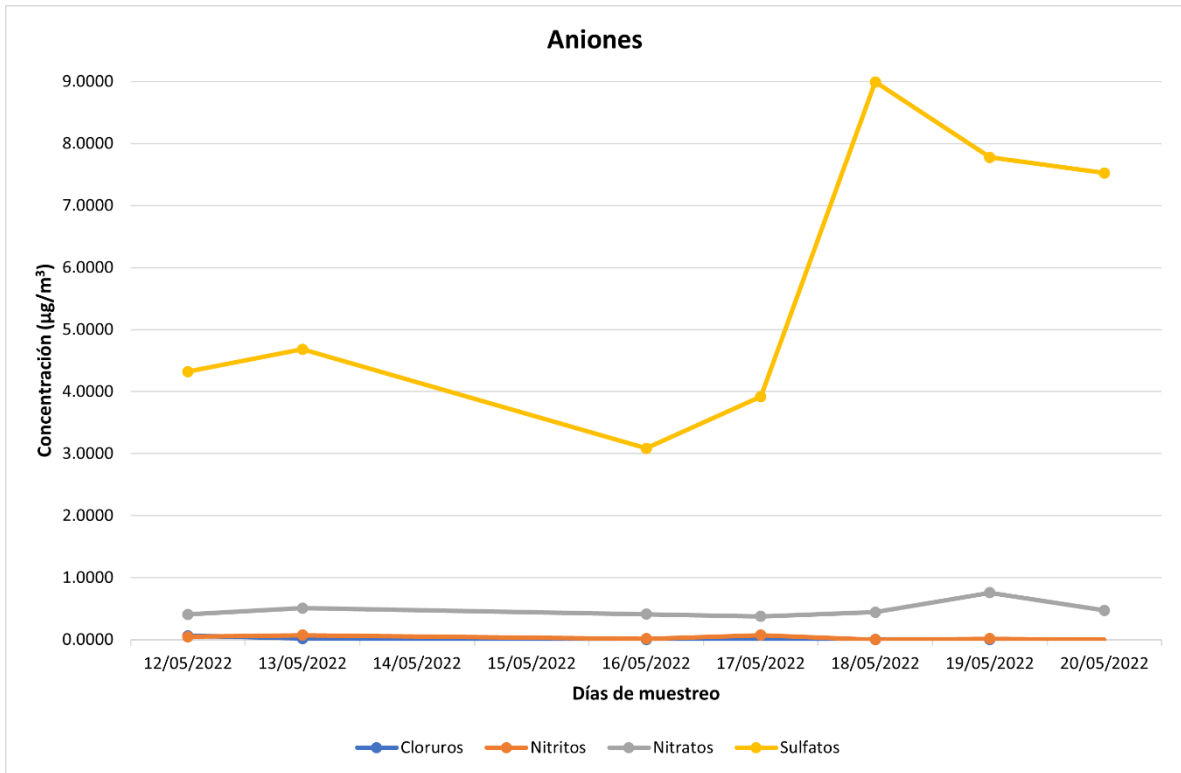
campana de muestreo entre los que se encuentran sodio, amonio, potasio, magnesio y calcio. Por otra parte en la Gráfica 5, se muestra la determinación para los aniones cloruros, nitritos, nitratos y sulfatos presentes en las muestras obtenidas. En la gráfica 6 se observa el promedio de la caracterización química de las muestras obtenidas durante la campana de muestreo, la cual muestra que se realizó la caracterización del 36% del material depositado en los filtros de teflón.



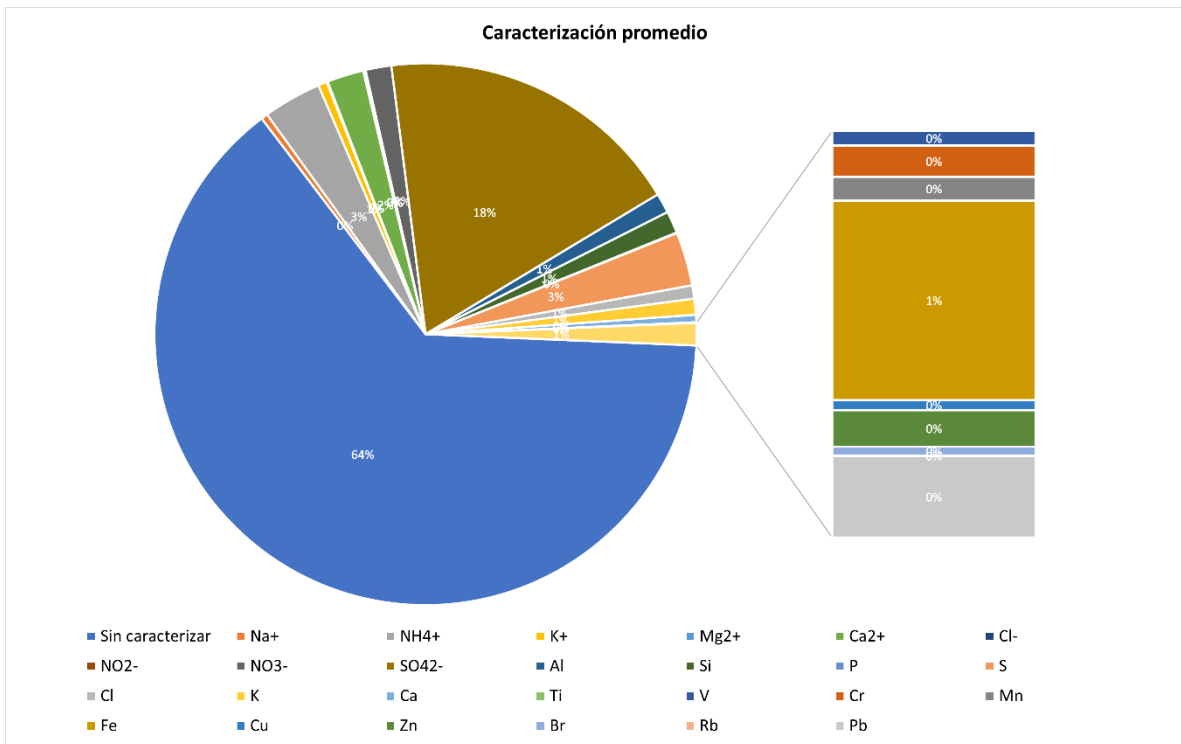
Gráfica 3. Concentración promedio de iones durante la campaña de muestreo.



Gráfica 4. Concentración de cationes durante la campaña de muestreo.



Gráfica 5. Concentración de aniones durante la campaña de muestreo.



Gráfica 6. Caracterización promedio durante la campaña de muestreo.

Durante la campaña de muestreo se observa una mayor predominancia de los cationes calcio y amonio, siendo este último el catión que presenta un aumento en concentración durante los últimos 3 días de muestreo durante la campaña, logrando alcanzar una concentración máxima de $1.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 18 de mayo del 2022. Así mismo, el catión magnesio es el que presenta la concentración más baja a lo largo de la campaña presentando concentraciones de entre 0.01 y $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Por otra parte, se observa una evidente predominancia del anión sulfato a lo largo de toda la campaña de muestreo, en comparación al resto de los aniones determinados en las muestras. Este anión logra alcanzar la concentración máxima de $8.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 18 de mayo del 2022. De igual manera, el anión que presenta una menor concentración a lo largo de la campaña son los nitratos con una concentración de entre 0.37 y $0.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Análisis de INP por la técnica MOUDI-DFT

La evaluación de la capacidad para la formación de núcleos de hielo de las partículas de aerosol ambiental a través de la congelación por inmersión consta de una secuencia de tres pasos: recolección de partículas de aerosol, eficiencia de formación de núcleos de hielo con la técnica de congelación de gotas (DFT, por sus siglas en inglés), y el cálculo de la concentración de INP en función de temperatura y tamaño de partícula.

Para realizar la determinación de las concentraciones de INP se realizó la evaluación haciendo uso del UNAM-MOUDI-DFT, el cual consta de cuatro secciones diferentes: platina fría, sistema de aire húmedo/seco, microscopio óptico con sistema de grabación de video y un sistema de adquisición de datos (Córdoba *et al.*, 2021).

Las muestras de aerosol recolectadas en los sustratos de vidrio se introdujeron y fijaron en la celda porta muestras que posteriormente se cubrió con un cubreobjetos de vidrio circular para evitar interferencias externas y se colocó en la parte superior del conjunto bloque caliente-bloque frío.

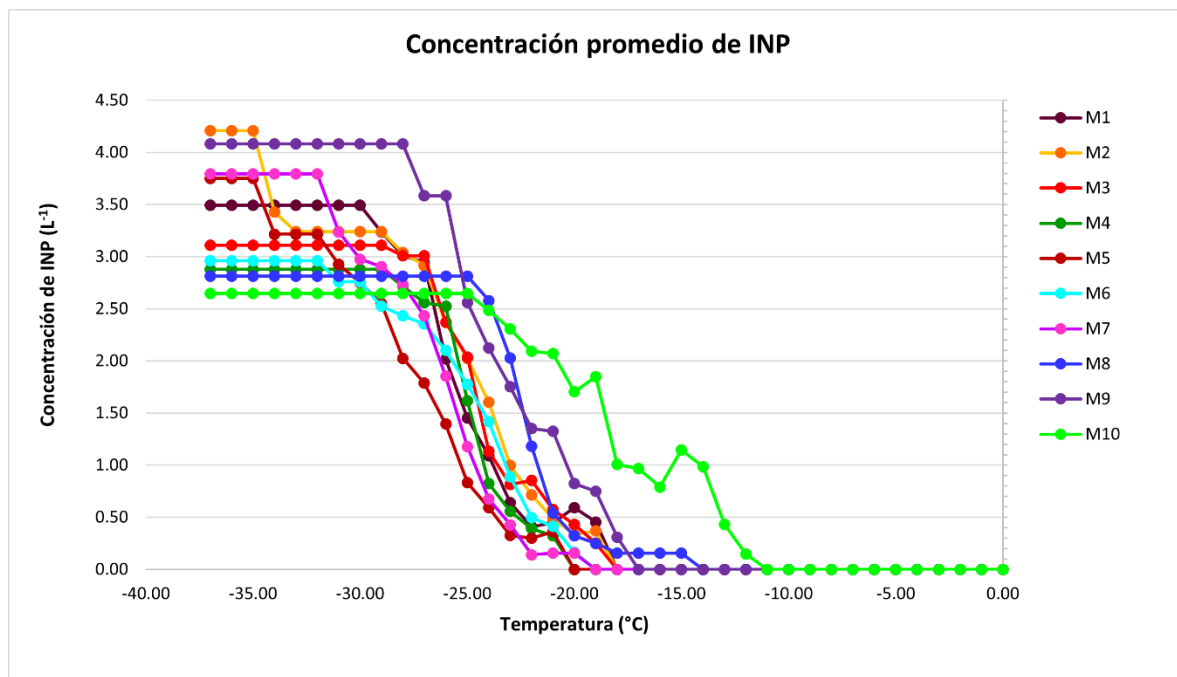
Una vez que la celda porta muestras se fijó en el sistema, se dirigió aire húmedo hacia la muestra para formar gotas de líquido al condensar vapor de agua en las partículas de aerosol. El flujo de aire húmedo se dejó hasta que se alcanzó el tamaño de gota deseado (aprox. $170 \mu\text{m}$) y, posteriormente, se usó aire seco para secar ligeramente las gotas y aislarlas de las gotas adyacentes. Finalmente, se aisló el sistema y se disminuyó la temperatura de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a una velocidad de enfriamiento de $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ para permitir la congelación de las gotas. Cada experimento se registró para su posterior análisis y los datos de temperatura se obtuvieron con un detector de temperatura de resistencia (RTD, por sus siglas en

inglés). El RTD se colocó en la celda porta muestras y se conectó a un dispositivo Fieldlogger (RS485, NOVUS). La temperatura de congelación de cada gota individual se obtuvo analizando los videos grabados y las temperaturas RTD. Las concentraciones de INP (L^{-1}) se determinaron siguiendo la Ecuación 2 (Cabrera-Segoviano *et al.*, 2022; Córdoba *et al.*, 2021).

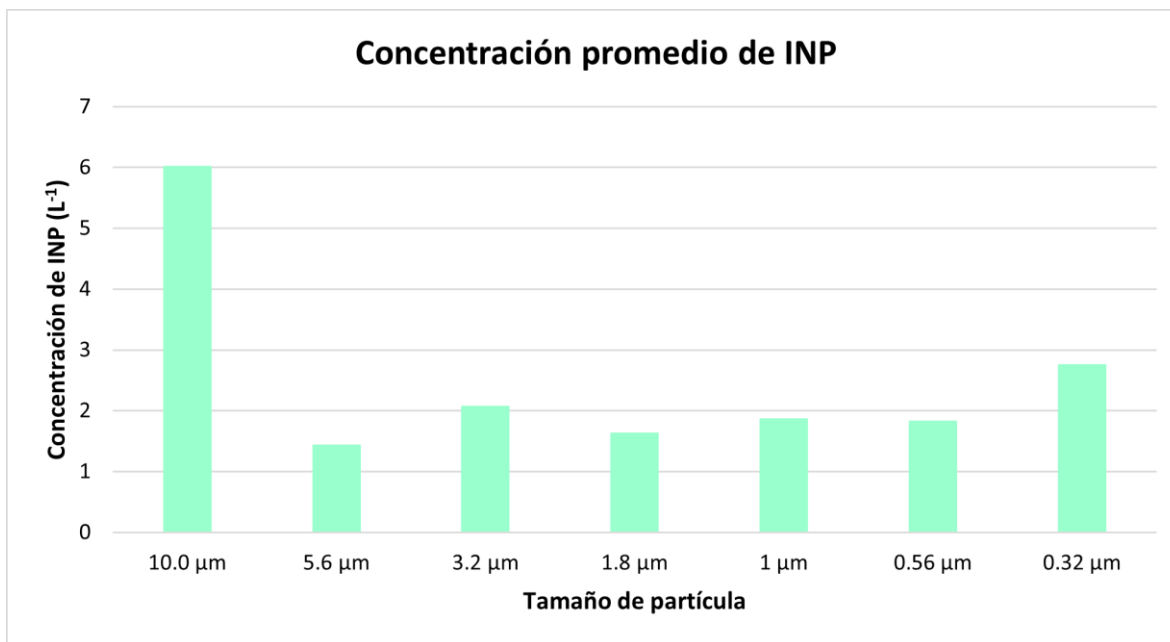
$$[INP(T)] = -\ln\left(\frac{N_u(T)}{N_o}\right) \left(\frac{A_{deposit}}{A_{DFTV}}\right) N_o \int_{nu, 0.25}^{0.1mm} \int_{ne} \int_{nu, 1mm} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Una vez realizados los cálculos de concentración de INP, se representó de manera gráfica la concentración promedio de INP obtenidas en función de la temperatura (Gráfica 7). En esta se puede observar la variación de concentración de las muestras obtenidas en función de la temperatura. Entre los $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ se observa el aumento de la concentración de INP, alcanzando una concentración máxima de 4.21 L^{-1} correspondiente al muestreo realizado el 13 de mayo de 2022 durante la campaña de muestreo. Así mismo, se observa que los INP más eficientes durante la campaña de muestreo corresponden a la muestra obtenida el 20 de mayo, ya que este congela entre los $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ a los $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, con concentraciones que van desde los 0.15 a los 2.65 L^{-1} .

En la Gráfica 8, se puede observar una mayor concentración de INP, 6.02 L^{-1} , en el tamaño de partícula de $10\text{ }\mu\text{m}$, mostrando un claro predominio frente al resto de los tamaños de corte para las partículas de aerosol atmosférico.



Gráfica 7. Concentración promedio de INP en función de la temperatura.



Gráfica 8. Concentración promedio de INP en función del tamaño de partícula.

Conclusiones

En el desarrollo de este estudio, las mediciones del material particulado PM_{2.5} colectados en Ciudad Universitaria durante mayo del 2022, muestran una concentración promedio de 31.31 $\mu\text{g m}^{-3}$ durante toda la campaña. Este valor no sobrepasa lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, la cual indica que los límites de exposición al material particulado PM_{2.5} de manera aguda (durante 24 horas) no debe ser mayor a 45 $\mu\text{g m}^{-3}$. Sin embargo, dentro de los análisis se presenta un valor que fuera este promedio, el 13 de mayo que obtuvo un máximo de 49.89 $\mu\text{g m}^{-3}$.

El análisis de XRF permitió determinar la presencia de diversos elementos en las muestras obtenidas, siendo el azufre el elemento mayoritario seguido por aluminio, silicio, cloro, potasio y hierro.

Por otra parte, el análisis de iones permitió mostrar que los iones más abundantes fueron sulfato, amonio y calcio mientras que los menos abundantes fueron sodio, magnesio, potasio y nitrato. Los porcentajes de los iones analizados conjuntamente al análisis de XRF no superaron el 40%, lo cual podría indicar que el resto de los compuestos presentes en las partículas atmosféricas del sitio de muestreo pueden ser de origen orgánico (Hidalgo-Reyes, 2016).

Finalmente el análisis de INP permitió demostrar que las partículas de aerosol colectadas en el sur de la Ciudad de México durante la campaña de muestreo tienen la capacidad de actuar como INP a través de la congelación por inmersión a temperaturas inferiores a -20 °C, en promedio.

Agradecimientos

A la RAMA, la RUOA y al ICAYCC por facilitar el acceso a sus instalaciones y datos. Así mismo, se extiende el agradecimiento a la Fundación Marcos Moshinsky por el financiamiento para el desarrollo del proyecto.

Referencias bibliográficas

- Alvarez-Ospina, H. (2009). *Calidad del aire en una región cafetalera, pacho viejo, veracruz*. [Tesis para obtener el título de maestro]. Universidad Nacional Autónoma De México. Repositorio TesiUNAM
<http://132.248.9.195/ptd2009/agosto/0646865/Index.html>.
- Cabrera-Segoviano, D., Pereira, D. L., Rodríguez, C., Raga, G. B., Miranda, J., Alvarez-Ospina, H., & Ladino, L. A. (2022). Inter-annual variability of ice nucleating particles in Mexico city. *Atmospheric Environment*, 273.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118964>
- Córdoba, F., Ramírez-Romero, C., Cabrera, D., Raga, G. B., Miranda, J., Alvarez-Ospina, H., Rosas, D., Figueroa, B., Sung Kim, J., Yakobi-Hancock, J., Amador, T., Garcíá, M., Bertram, A. K., Baumgardner, D., & Ladino, L. A. (2021). Measurement report: Ice nucleating abilities of biomass burning, African dust, and sea spray aerosol particles over the Yucatán Peninsula. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(6). <https://doi.org/10.5194/acp-21-4453-2021>
- Espinosa, A. A., Miranda, J., Hernández, E., Reyes, J., Alarcón, A. L., Torres, M. C., & Sosa, R. (2019). Temporal variation of suspended particles (TSP, PM10, and PM2.5) and chemical composition of PM10 in a site at the coast of the Gulf of Mexico. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 12(11).
<https://doi.org/10.1007/s11869-019-00730-8>
- Falcon-Rodríguez, C. I., De Vizcaya-Ruiz, A., Rosas-Pérez, I. A., Osornio-Vargas, Á. R., & Segura-Medina, P. (2017). Inhalation of concentrated PM2.5 from Mexico City acts as an adjuvant in a guinea pig model of allergic asthma. *Environmental Pollution*, 228, 474–483.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.050>
- Hernandez-López, A. E., Miranda, J., & Pineda, J. C. (2016). X-Ray Fluorescence Analysis of Fine Atmospheric Aerosols from a Site in Mexico City. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, 4(1), 25–30.
<https://doi.org/10.15415/jnp.2016.41003>

- Hidalgo-Reyes, C. (2016). *Caracterización de partículas atmosféricas en Ciudad Universitaria, utilizando técnicas analíticas diferentes (cromatografía de intercambio iónico y espectrometría de masas)*. [Tesis para obtener el título de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio TesiUNAM <http://132.248.9.195/ptd2016/mayo/0744928/Index.html>.
- Izquierdo, P. M. M., Guillermo, J., & González, C. (2009). Measurement of atmospheric NO₂ by passive samplers and ion interchange chromatography. *Ingeniería y Desarrollo*, 2, 25–47. <https://hdl.handle.net/10495/26334>
- Molina, L. T., Madronich, S., Gaffney, J. S., Apel, E., De Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jimenez, J. L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A. R., Russell, P., Schauer, J. J., Stevens, P. S., Volkamer, R., & Zavala, M. (2010). An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. In *Atmospheric Chemistry and Physics* (Vol. 10, Issue 18). <https://doi.org/10.5194/acp-10-8697-2010>
- Nazarenko, Y., Pal, D., & Ariya, P. A. (2021). Air quality standards for the concentration of particulate matter 2.5, global descriptive analysis. *Bulletin of the World Health Organization*, 99(2). <https://doi.org/10.2471/BLT.19.245704>
- Nemmar, A., Holme, J. A., Rosas, I., Schwarze, P. E., & Alfaro-Moreno, E. (2013). Recent advances in particulate matter and nanoparticle toxicology: A review of the in vivo and in vitro studies. In *BioMed Research International* (Vol. 2013). <https://doi.org/10.1155/2013/279371>
- Pereira, D. L., Gavilán, I., Letechipía, C., Raga, G. B., Puig, T. P., Mugica-Álvarez, V., Alvarez-Ospina, H., Rosas, I., Martínez, L., Salinas, E., Quintana, E. T., Rosas, D., & Ladino, L. A. (2022). Mexican agricultural soil dust as a source of ice nucleating particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(10), 6435–6447. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6435-2022>
- Reynoso-Cruces, S. (2022). *Estudio del aerosol atmosférico presente en ambientes intramuros de la Zona Metropolitana del Valle de México*. [Tesis para obtener el título de maestro]. Universidad Nacional Autónoma De México. Repositorio TesiUNAM <http://132.248.9.195/ptd2022/agosto/0828796/Index.html>.
- Vega-Aguilar, N. V. (2022). *Efectos del SARS-COV-2 en la calidad del aire sobre la Zona Metropolitana del Valle de México*. [Tesis para obtener el título de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma De México. Repositorio TesiUNAM <http://132.248.9.195/ptd2022/mayo/0825610/Index.html>.