

Análisis de la calidad del aire en el área metropolitana de Monterrey

Julián Alfaro-Chacón, Adriana Alvarez-Ramos, Sara D. Álvarez-Sosa, Emireth A. Mellado-Lira, Edith Luévano-Hipólito

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil-Departamento de Ecomateriales y Energía

julian.alfarocho@uanl.edu.mx, adriana.alvarezrm@uanl.edu.mx, sara.alvarezs@uanl.edu.mx, emireth.melladol@uanl.edu.mx, edith.luevanohp@uanl.edu.mx

RESUMEN

El área metropolitana de Monterrey (AMM) es considerada una de las más contaminadas de México. Por lo que, con el objetivo de analizar la distribución de los contaminantes criterio en el aire: PM10, PM2.5, CO, O₃, SO₂ y NO₂ del AMM, se registró su concentración en los últimos tres años en 14 estaciones de monitoreo durante las temporadas: invierno, primavera, verano y otoño. De acuerdo con el análisis, las concentraciones de O₃, CO, NO_x y SO₂ resultaron significativamente afectadas por el año, temporada y estación analizada; mientras que, para PM (2.5 y 10) solo la temporada y estación resultaron significativas.

PALABRAS CLAVE

Contaminación del aire, contaminantes atmosféricos, estaciones de monitoreo, PM10, PM2.5, Ozono, CO, NO_x, SO₂.

ABSTRACT

Monterrey metropolitan area is considered one of the most polluted in Mexico. Therefore, to analyze the distribution of the criteria pollutants in the air: PM10, PM2.5, CO, O₃, NO_x, and SO₂, their concentration was recorded in the last three years in 14 monitoring stations during the seasons: winter, spring, summer, and autumn. According to the analysis, O₃, CO, NO_x, and SO₂ concentrations were significantly affected by the year, season, and season analyzed; meanwhile, for PM (2.5 and 10), only season and station were significant.

KEYWORDS

Air pollution, air pollutants, monitoring stations, PM10, PM2.5, Ozone, CO, NO_x, SO₂.

INTRODUCCIÓN

Aspectos generales de la contaminación del aire

La contaminación del aire se refiere a cualquier adición de materia o energía que degrada el ambiente para los seres vivos que lo habitan. Típicamente, la composición del aire es de 78.1% de nitrógeno, 20.9% de oxígeno y el resto (1%) lo componen diversos gases como el argón, dióxido de carbono, metano y el vapor de agua.¹

La dependencia de la sociedad actual a los combustibles fósiles, altamente contaminantes, ha cambiado la forma en la que se vive y se respira en el planeta, lo que representa una catástrofe para la salud humana y el medio ambiente. La quema de combustibles fósiles es uno de los principales contribuyentes al calentamiento global, así como a la generación de problemas ambientales, como el smog y la lluvia ácida.² Diversos estudios han destacado los impactos globales del calentamiento global como el derretimiento de los polos, el aumento del nivel del mar, inundaciones en zonas costeras, la desecación de las selvas tropicales y el aumento de incendios forestales. Esta problemática también ha alterado la temperatura del agua en los hemisferios, lo que ha resultado en una menor

formación de lluvia en áreas clave.³ El impacto de la contaminación atmosférica se manifiesta en forma de calentamiento global y una mortalidad prematura de millones de personas, particularmente 1.3 millones de personas en el periodo de 1998 a 2017 y la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima 250,000 muertes por año entre el 2030 y 2050.⁴ Además, de otras afectaciones al medio ambiente tales como precipitaciones y sequías extremas que provocan la pérdida de cultivos, intensificación de desastres naturales, niebla y neblina, lo que pone en peligro la vida cotidiana, los ecosistemas y acelera la pérdida de flora y fauna, entre otros.

Si bien muchos contaminantes atmosféricos antropogénicos son tóxicos, existen seis contaminantes criterio que están regulados por los gobiernos de la mayoría de los países debido a sus impactos nocivos para la salud humana y el medio ambiente, estos son: ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) y dióxido de azufre (SO₂).⁵ El origen de estos contaminantes se esquematiza en la figura 1. Por ejemplo, el CO es producido cuando los combustibles fósiles, la leña y los residuos urbanos son incinerados con oxígeno insuficiente. El material particulado consiste en fragmentos sólidos pequeños (<10 µm) y en gotas de líquido dispersas en la atmósfera; mientras que, las partículas mayores a 2.5 µm consisten en polvo y partículas de carbono. El uso del automóvil, la agricultura, los sitios de construcción, los procesos industriales y las partículas de humo provenientes de incendios forestales son las principales fuentes del material particulado.⁶ El SO₂ es generado cuando los combustibles fósiles, que contienen azufre, son quemados. Más de 65% del SO₂ liberado en la atmósfera proviene de plantas de energía, principalmente de aquellas que queman carbón. Por otro lado, la quema de combustibles fósiles produce una mezcla de compuestos que contienen nitrógeno y oxígeno que se conocen como óxidos de nitrógeno (NO_x), cuya principal fuente son los vehículos motorizados (50%).⁷ Finalmente, el ozono troposférico es un contaminante secundario, ya que no se emite directamente, sino que se forma debido a reacciones fotoquímicas de NO_x y compuestos orgánicos volátiles (COVs).⁸

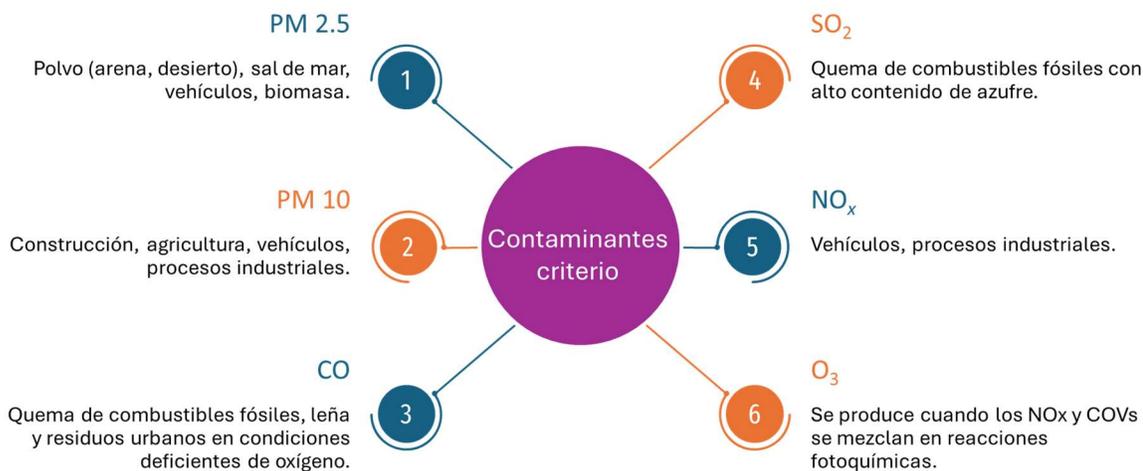


Fig. 1. Principales fuentes de los contaminantes criterio.⁶⁻⁸

El problema de la contaminación del aire en el mundo es claro. Hoy en día, alrededor del 90% de la población que vive en ciudades urbanas respira aire con altos índices de contaminación, con concentraciones superiores a las recomendadas por la OMS. Las oportunidades para vincular las políticas agrícolas, climáticas y atmosféricas aún no se han explorado lo suficiente, lo que conlleva a soluciones menos efectivas para la salud humana, los ecosistemas y el cambio climático.

En la actualidad se han puesto en marcha diversos acuerdos y tratados que tienen el objetivo de pausar y/o revertir los efectos de la contaminación ambiental. Entre estos se destacan el Protocolo de

Kioto y el Acuerdo de París, ambos derivados de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El Protocolo de Kioto fue aprobado el 11 de diciembre de 1997; sin embargo, entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005 comprometiendo a los países industrializados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En conjunto, los compromisos suponen una reducción media de las emisiones del 5% en comparación con los niveles de 1990, entre 2008 y 2012. El 12 de diciembre del 2015 se logró el segundo acuerdo del Acuerdo de París, teniendo como objetivo reforzar la respuesta mundial al cambio climático manteniendo el aumento de la temperatura mundial por debajo de los 2°C sobre niveles preindustriales, además de aumentar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y lograr que las corrientes de financiación sean coherentes con un nivel bajo de emisiones de gases de efecto invernadero. Como parte de este último, el 13 de diciembre del 2021 se adoptó el Pacto de Glasgow como resultado de la Conferencia de Naciones Unidas por el Cambio Climático (COP26). El paquete de decisiones consta de una serie de esfuerzos acordados para aumentar la resiliencia al cambio climático, frenar las emisiones de gases de efecto invernadero y proporcionar la financiación necesaria para ambos. Por primera vez, se pide a las naciones que eliminen gradualmente la energía a base de carbón y los subsidios ineficientes a los combustibles fósiles.⁹

México ha sido una de las economías emergentes más activas desde la implementación del Protocolo de Kioto en 2000, realizando esfuerzos importantes en la comunicación de los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero, así como ser el primer país de este grupo, en presentar sus Contribuciones Nacionales Determinadas (INDC por sus siglas en inglés), lo que demuestra los esfuerzos nacionales para reducir sus emisiones dentro del Acuerdo de París, extensión de este protocolo. Muchas economías en desarrollo han presentado reducciones de emisiones tanto incondicionales (independientemente del panorama internacional), como condicionales (una vez alcanzados los acuerdos globales). En este sentido, México presentó su INDC, que consistió en la reducción de gases de efecto invernadero del 25 (incondicional) al 40% (condicional) y de contaminantes climáticos de vida corta para el 2030. El objetivo incondicional implica reducciones de las emisiones de GEI del 22% y de los CCVC del 51% para 2030.¹⁰

Contaminación del aire en México

La contaminación del aire en México representa un problema crítico desde hace varias décadas a pesar de los esfuerzos realizados para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Esto ha repercutido directamente en la salud de la población más vulnerable, así como en afectaciones al medio ambiente tales como cambios en los patrones de precipitación, sequías, inundaciones, temperaturas elevadas, daño a la flora y fauna, entre otros. De acuerdo con un reporte de la SEMARNAT en 2014 se emitieron a la atmósfera un aproximado de 23.3 millones de toneladas de contaminantes, sin tomar en cuenta las fuentes móviles.¹¹ Debido a la creciente contaminación del aire a la que nos enfrentamos día a día, México ha propuesto diferentes normativas que regulan las concentraciones permisibles de los contaminantes criterio en todo el territorio nacional: la NOM-025-SSA1 se encarga de regular las PM10 y las PM2.5, la NOM-020-SSA1 al O₃, la NOM-021-SSA1 al CO, la NOM-022-SSA1 al SO₂ y, por último, la NOM-023-SSA1 hace recomendaciones para la concentración de NO₂. Sin embargo, pocos son los estados que cumplen y se ajustan a dichas normativas.¹² Por lo que, es crítico mejorar el funcionamiento de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire en México, lo que implica aumentar su cobertura, difundir certera, contante y tempranamente la información resultante, así como evaluar las fuentes contaminantes de cada estado y establecer estrategias de mitigación o de reducción de contaminación.

En los últimos 30 años, las instituciones responsables en materia ambiental del país (SEMARNAT, INECC, SINAICA, CONABIO, CONAFOR, PROFEPA, CONANP) han implementado estrategias de monitoreo, manejo y control de la contaminación del aire en las principales áreas urbanas del país, incluidas la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Toluca, Puebla, Mexicali, Ciudad Juárez y Tijuana conforme lo establecido en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEEPA).¹³ Entre estas estrategias, desataca el programa “hoy no circula”

implementada en CDMX y otros programas de gestión para mejorar la calidad del aire (ProAire) a nivel nacional. Hasta febrero de 2024, México cuenta con 26 Entidades Federativas con ProAires vigentes, que beneficia a 104 millones 120 mil 210 habitantes de la república mexicana.¹⁴ Entre ellos, el estado de Nuevo León, particularmente su área metropolitana, se considera con uno de los índices de contaminación más altos del país.

Contaminación del aire en Monterrey

Desde hace dos décadas el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) ha incrementado considerablemente el número de habitantes, automóviles, actividad industrial y comercial, lo que se ha traducido en una mala calidad del aire. De acuerdo con un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), los automóviles en el AMM emiten 40% más CO que los de los CDMX, debido a que ahí, desde hace más de 20 años se implementa el programa de verificación vehicular.¹⁴ En el AMM las principales fuentes de contaminación son: la libre introducción de vehículos de segundo uso originarios de la frontera norte, la deficiencia del transporte público, las industrias instaladas que, al estar rodeadas de cerros, limita el flujo del aire y a su vez, favorece que los gases contaminantes se queden atrapados en la zona.¹⁵ Por lo que, es fundamental continuar con los monitoreos de la calidad del aire y revisar periódicamente su correcto funcionamiento para garantizar la identificación de las áreas con mayor concentración de contaminantes, el contaminante predominante y con base en eso, determinar las medidas óptimas de mitigación. Considerando esto, en esta investigación se analizaron las tendencias de la contaminación atmosférica en el AMM durante el periodo 2021 al 2023 en las diferentes estaciones de monitoreo y temporada del año. Para este propósito, se consideraron las concentraciones de los contaminantes criterio: PM 2.5, PM 10, CO, O₃, NO₂ y SO₂, con la finalidad de analizar su comportamiento en el AMM y usar esta información como una posible guía para proponer mejores y soluciones alternas para contribuir al mejoramiento de la calidad de aire en el AMM.

METODOLOGÍA

Para el análisis de la calidad de aire en Nuevo León se consideró el área metropolitana de Monterrey ya que es la zona donde se realiza la mayor parte de actividad económica del estado. El AMM está formada por 18 municipios y es la zona donde habita la mayor parte de la población, con 5,341.17 habitantes (hasta el año 2020) en 7,691,66 km² de superficie.¹⁶ Los municipios que conforman el AMM son: Abasolo, Apodaca, Cadereyta Jiménez, Ciénega de Flores, El Carmen, García, General Escobedo, General Zuazua, Guadalupe, Hidalgo, Juárez, Monterrey, Pesquería, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, San Pedro de los Garza García, Santa Catarina y Santiago.

El monitoreo ambiental del AMM se realiza en 15 estaciones de monitoreo en diferentes puntos estratégicos, registrando emisiones de CO, O₃, NO₂, SO₂, PM 2.5, PM 10, COVs, NH₃, así como la temperatura, humedad relativa y radiación solar.¹⁷ Las estaciones de monitoreo ambiental se encuentran distribuidas en el AMM como se observa en la figura 2.

Los datos de ubicación geográfica de las estaciones se muestran en la tabla I. Como se observa, la mayoría de las estaciones coinciden directamente con un municipio del AMM; sin embargo, algunas residen en diferentes lugares dentro de un mismo municipio a la vez. El primer caso es de la estación *La Pastora*, ubicada en el interior del zoológico La Pastora, sobre la avenida Eloy Cavazos y Pablo Livas en el municipio de Guadalupe. La estación *Misión San Juan* se ubica dentro del parque industrial Ciudad Mitras, en la colonia del mismo nombre ubicada en la carretera que conecta Monterrey con el municipio de García. Dentro de los patios de Agua y Drenaje se encuentra la estación *Obispado*, en la colonia Nuevo Obispado en el centro de Monterrey. La estación *Pueblo Serena* se ubica sobre la carretera nacional, en la colonia Valle Alta, conectando el municipio de Monterrey con el de Santiago. La estación *San Bernabé* se instaló dentro de los patios de Monterrey, a un lado del cerro de Topo Chico. Por último, la estación Universidad se encuentra dentro de Ciudad Universitaria, en el municipio de San Nicolás.¹⁸



Fig. 2. Mapa del área metropolitana de Monterrey y la ubicación de sus estaciones de monitoreo.¹⁷

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, las estaciones de monitoreo se ubican en zonas de posible riesgo ambiental, tales como: asentamientos humanos con más de 500,000 habitantes, zonas de actividad industrial que requieran el monitoreo y muestreo de contaminantes atmosféricos, zonas degradadas por el hombre y zonas metropolitanas en general, para que las concentraciones registradas en cada zona sean representativas.¹⁹ En resumen, las estaciones de monitoreo en el AMM se ubican en zonas estratégicas que permiten evaluar los impactos ambientales en fuentes fijas (industrias) y fuentes móviles (tráfico vehicular) en áreas de gran concentración poblacional, como las zonas habitacionales y comerciales rodeadas de zonas industriales y/o áreas desprovistas de vegetación.²⁰

Con el objetivo de analizar la tendencia de la contaminación del aire en el AMM, se extrajeron los datos de la concentración de seis contaminantes criterio: PM₁₀, PM_{2.5}, Ozono, CO, NO_x y SO₂ del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). Esta red de monitoreo se encarga de recabar, transmitir y publicar información acerca de la calidad del aire registrada en las diferentes estaciones de monitoreo ubicadas en zonas estratégicas del territorio nacional.¹⁸

En esta investigación se consideraron los datos de los años: 2021, 2022 y 2023 en diferentes temporadas (invierno, primavera, verano y otoño) como factores de bloque, los cuales se incorporaron con el objetivo de lograr una comparación más precisa de los datos recopilados. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para cada uno de los contaminantes criterio en este periodo usando el *software* Minitab®, en el cual se obtuvieron gráficos que permitieron visualizar la información obtenida. Los términos del ANOVA incluyen a la suma de cuadrados (SC), cuadrados medios (CM) y el valor del estadístico F, los cuales fueron calculados considerando diferentes grados de libertad (GL) para cada fuente de variación (FV): 2 para año, 3 para la temporada y 13 para las estaciones (ya que la estación 7 no registró datos en el periodo de estudio). Otra de las herramientas utilizadas fue la prueba de *Tukey* para comparar las medias de los tratamientos y así, obtener información detallada acerca de las diferencias entre cada estación, año y temporada. Como referencia, en la tabla II se muestra un ejemplo del acomodo de la información extraída del SINAICA por contaminante en la estación 1 durante el 2023.

Tabla I. Datos de ubicación de las estaciones de monitoreo.

No.	Estación	Latitud (N)	Longitud (O)	Elevación (msnm)	Municipio/Zona
1	Apodaca	25° 44'29.81"	100° 18'60.00"	612	Apodaca
2	Cadereyta	25° 36'0.00"	99° 59'24.00"	330	Cadereyta
3	Escobedo	25° 48'0.00"	100° 20'24.00"	560	Escobedo
4	García	25° 46'48.00"	100° 35'24.00"	787	García
5	Juárez	25° 38'60.00"	100° 5'60.00"	396	Juárez
6	La Pastora	25° 40'12.00"	100° 15'0.00"	505	Zoológico La Pastora
7	Misión San Juan	25° 47'04.00"	100° 27'47.00"	606	García
8	Obispado	25° 40'48.00"	100° 20'24.00"	634	Monterrey
9	Pesquería	25° 47'24.00"	100° 04'48.00"	351	Pesquería
10	Pueblo Serena	25° 34'48.00"	100° 15'0.00"	603	Carretera nacional
11	San Bernabé	25° 45'36.00"	100° 22'12.00"	559	Patios Monterrey
12	San Nicolás	25° 45'0.00"	100° 15'36.00"	476	San Nicolás de los Garza
13	San Pedro	25° 40'12.00"	100° 24'36.00"	937	San Pedro Garza García
14	Santa Catarina	25° 40'48.00"	100° 27'36.00"	691	Santa Catarina
15	Universidad	25° 43'48.00"	100° 18'36.00"	530	Zona industrial San Nicolás

Tabla II. Concentración (media) de los seis contaminantes criterio en la estación de monitoreo 1 durante el 2023.

Temporada	Mes	2023 (Estación 1: Apodaca)					
		PM _{2.5}	PM ₁₀	CO	O ₃	NO _x	SO ₂
		µg/m ³	µg/m ³	ppm	ppm	ppm	ppm
Invierno	Enero	9.00	72.00	1.44	0.005	0.05636	0.00500
	Febrero	21.00	82.00	1.67	0.021	0.04576	0.00514
	Marzo	24.00	85.00	1.90	0.023	0.03636	0.00514
Primavera	Abril	4.00	56.00	0.00	0.008	0.01463	0.00417
	Mayo	25.00	66.00	1.26	0.025	0.02976	0.00429
	Junio	9.00	55.00	0.00	0.006	0.01362	0.00301
Verano	Julio	23.00	64.00	1.34	0.037	0.02550	0.00289
	Agosto	23.00	63.00	1.65	0.040	0.02601	0.00304
	Septiembre	19.00	58.00	1.40	0.035	0.02917	0.00422
Otoño	Octubre	20.00	76.00	1.57	0.024	0.03756	0.00346
	Noviembre	20.00	71.00	2.06	0.023	0.04236	0.00401
	Diciembre	29.00	98.00	2.38	0.022	0.05630	0.00525

RESULTADOS**Análisis del efecto de las fuentes de variación: año, estación de monitoreo y temporada del año en la contaminación del aire**

El análisis de las concentraciones de cada contaminante criterio en el aire del AMM durante el periodo del 2021 al 2023 se realizó mediante un análisis de varianza considerando como fuente de variación el año, la temporada y la estación de monitoreo. Los resultados del análisis de cada contaminante se muestran en la tabla III. De acuerdo con los resultados, la concentración de los contaminantes O₃, CO, NO_x y SO₂ resultó significativamente afectada por el año, la temporada y la estación analizada; mientras que, para el material particulado solo la temporada y la estación resultaron significativas, al considerar un valor de alfa (significancia α) de 0.01.

Tabla III. Análisis de varianza de los seis contaminantes criterio en el AMM del 2021-2023.

Contaminante	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	p
PM 2.5	Año	2	189.4	94.7	1.5	0.220
	Temporada	3	2215.6	738.5	11.9	0.000*
	Estación	13	18727.3	1440.6	23.1	0.000*
	Error	485	302223.8	62.3		
	Total	503	51356.1			
PM 10	Año	2	72	36.2	0.3	0.775
	Temporada	3	36058	12019.5	84.5	0.000*
	Estación	13	40861	3143.1	22.1	0.000*
	Error	485	68957	142.2		
	Total	503	145948			
CO	Año	2	4.7	2.3	5.5	0.004*
	Temporada	3	7.1	2.4	5.6	0.001*
	Estación	13	64.3	4.9	11.7	0.000*
	Error	485	205.9			
	Total	503	281.9			
O ₃	Año	2	0.0013	0.0007	10.3	0.000*
	Temporada	3	0.0041	0.0014	21.1	0.000*
	Estación	13	0.0035	0.0003	4.2	0.000*
	Error	485	0.0315			
	Total	503	0.0405			
NO _x	Año	2	0.0021	0.0011	8.1	0.000*
	Temporada	3	0.0412	0.0137	105.8	0.000*
	Estación	13	0.0125	0.0009	7.4	0.000*
	Error	485	0.0630			
	Total	503				
SO ₂	Año	2	0.000176	0.000088	29.1	0.000*
	Temporada	3	0.000048	0.000048	16.0	0.000*
	Estación	13	0.000571	0.00044	14.6	0.000*
	Error	485	0.000003			
	Total	503	0.002355			

* Significativas (valor-p<0.01).

De la tabla anterior se demostró que la variación en las concentraciones de los diferentes contaminantes criterio según las fuentes de variación analizadas resultó significativa (valor-p<0.01). Sin embargo, para conocer las similitudes o la diferencia entre los valores medios de las concentraciones de cada contaminante, se aplicó la prueba de Tukey para medias homogéneas. En la Tabla IV se muestran las medias de cada contaminante durante el periodo del 2021 al 2023 en las diferentes estaciones de monitoreo. En este análisis, las medias que comparten letra (superíndice) son estadísticamente iguales. A partir de este análisis, se infiere que, si bien cada uno de los contaminantes muestra una distinta dispersión dentro del área metropolitana, la estación 14 (ubicada en Santa Catarina) registró la mayor concentración de todos los contaminantes del aire analizados. Esto puede estar relacionado con la alta actividad industrial de la zona. También, la estación 8 (en el Obispado)

es una de la que registra mayores índices de contaminación de material particulado, monóxido de carbono y ozono. Otro aspecto que destacar es que el ozono presentó una dispersión homogénea en toda el área metropolitana de Monterrey, lo que debería tomarse en cuenta para evitar el daño a la salud de las personas y el daño a la vegetación debido a su alto poder oxidante.²¹ Por otro lado, las estaciones 1 (Apodaca) y 8 (Santa Catarina) son las que registran la mayor contaminación por gases ácidos como NO_x y SO₂.

Tabla IV. Comparación de las medias de los seis contaminantes criterio considerando la estación de monitoreo como fuente de variación en el periodo de 2021-2023.

Estación	Contaminante del aire					
	PM 2.5 (µg/m ³)	PM 10 (µg/m ³)	CO (ppm)	O ₃ (ppm)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)
1	19.472 ^{b,c}	67.194 ^{a,b}	1.625 ^{a,b}	0.019 ^{b,c}	0.030 ^{a,b,c}	0.005 ^{a,b,c}
2	15.197 ^c	62.444 ^{a,b,c}	1.097 ^{b,c,d}	0.022 ^{a,b,c}	0.018 ^d	0.007 ^a
3	15.283 ^c	60.333 ^{a,b,c}	0.794 ^{d,e}	0.023 ^{a,b,c}	0.026 ^{b,c,d}	0.004 ^{c,d,e}
4	15.652 ^c	57.833 ^{a,b,c,d}	1.283 ^{a,b,c,d}	0.023 ^{a,b,c}	0.024 ^{b,c,d}	0.004 ^{c,d,e}
5	25.730 ^a	66.678 ^a	1.217 ^{a,b,c,d}	0.022 ^{a,b,c}	0.025 ^{b,c,d}	0.005 ^{b,c,d}
6	16.333 ^c	51.972 ^{a,b,c}	1.494 ^{a,b,c}	0.027 ^a	0.020 ^{c,d}	0.004 ^{c,d,e}
8	20.933 ^{a,b,c}	61.278 ^{a,b,c}	1.776 ^a	0.026 ^{a,b}	0.023 ^{b,c,d}	0.005 ^{b,c,d}
9	0.000 ^d	36.667 ^e	0.372 ^e	0.026 ^{a,b}	0.020 ^{c,d}	0.004 ^{d,e}
10	15.148 ^c	46.583 ^{d,e}	0.974 ^{c,d}	0.024 ^{a,b,c}	0.022 ^{b,c,d}	0.003 ^e
11	18.005 ^c	50.000 ^{c,d}	1.521 ^{a,b,c}	0.018 ^c	0.027 ^{b,c,d}	0.005 ^{a,b,c}
12	21.389 ^{a,b,c}	62.889 ^{a,b,c}	1.617 ^{a,b}	0.027 ^{a,b}	0.024 ^{b,c,d}	0.004 ^{c,d,e}
13	17.304 ^c	64.528 ^{a,b}	1.259 ^{a,b,c,d}	0.026 ^{a,b}	0.024 ^{b,c,d}	0.004 ^{c,d,e}
14	27.054 ^a	66.333 ^a	1.372 ^{a,b,c,d}	0.025 ^{a,b,c}	0.032 ^{a,b}	0.006 ^{a,b}
15	19.394 ^{b,c}	69.306 ^a	1.169 ^{b,c,d}	0.024 ^{a,b,c}	0.038 ^a	0.004 ^{c,d,e}

Nota 1: La estación 7 no se muestra porque no tiene registro antes del 2023.

Nota 2: Las medias que comparten letra son estadísticamente iguales.

Por otro lado, la comparación de las medias de las concentraciones de los seis contaminantes por año y temporada se muestra en la tabla V. Como se observa, las medias de la concentración del material particulado por año resultaron iguales durante el periodo de estudio; mientras que otros contaminantes como el O₃ y los NO_x van en aumento. También, se observa que las temporadas con mayor contaminación fueron invierno y otoño durante el periodo de estudio; a excepción del ozono que predominó en primavera y verano, probablemente por el incremento en la temperatura y a una mayor radiación solar recibida.

Tabla V. Concentración media de los contaminantes criterio considerando el año y la temporada como FV.

FV	Valor	Contaminante del aire					
		PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	O ₃ (ppm)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)
Año	2021	18.4870 ^a	59.3900 ^a	1.3274 ^a	0.0215 ^b	0.0229 ^b	0.00501 ^a
	2022	17.3470 ^a	58.6700 ^a	1.3187 ^a	0.0244 ^a	0.0256 ^{a,b}	0.00529 ^a
	2023	17.0710 ^a	58.5200 ^a	1.1189 ^b	0.0253 ^a	0.0278 ^a	0.00392 ^b
Temporada	Invierno	19.2300 ^a	69.4100 ^a	1.4386 ^a	0.0209 ^b	0.0297 ^b	0.00558 ^a
	Primavera	17.2330 ^{a,b}	54.5100 ^b	1.1513 ^a	0.0273 ^a	0.0176 ^c	0.00428 ^b
	Verano	14.3780 ^b	47.4920 ^c	1.1484 ^a	0.0258 ^a	0.0162 ^c	0.00484 ^{a,b}
	Otoño	19.7050 ^a	64.0300 ^a	1.2817 ^a	0.0210 ^b	0.0382 ^a	0.00427 ^b

Nota: Las medias que comparten letra son estadísticamente iguales.

En la figura 3 se resumen algunos de los datos obtenidos a partir del análisis anterior por contaminante. Es importante identificar los gases presentes en las diferentes zonas del área metropolitana de Monterrey para proponer e implementar diferentes estrategias que permitan disminuir la contaminación del aire y el riesgo que implica en la salud de la población, flora y fauna. Aunado a esto, se ha reportado que la contaminación del aire también puede causar daños estructurales y erosión en los edificios, causando pérdidas económicas. Por ejemplo, se ha reportado el costo de limpiar y reparar fachadas por kg de emisión de PM 10, SO₂ y NO₂, en países como Noruega, siendo mayor el costo por la contaminación de óxidos de nitrógeno (100 euros/kg contaminante).²² Lo que representa un área de oportunidad para desarrollar nuevos productos tecnológicos para disminuir la contaminación del aire.

Asimismo, es importante destacar que la OMS sugiere valores máximos recomendados por contaminante por año, cada 24 h, 8 h y en algunos casos por temporada, con el objetivo de evitar daños en la población más vulnerable como menores de edad y personas de la tercera edad. A modo de ejemplo se destaca la concentración recomendada por la OMS para el material particulado PM 2.5 (5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y PM 10 (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) por año; mientras que, la NOM-025-SSA I recomienda no superar más de 12 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado en el mismo periodo. De acuerdo con los resultados, la concentración media (anual) del material particulado en el periodo de estudio, supera el límite recomendado tanto por la OMS como por la NOM-025-SSA1. La comparación de estos límites con los otros contaminantes no fue realizada debido a que la normativa se realiza cada 8 o 24 h.

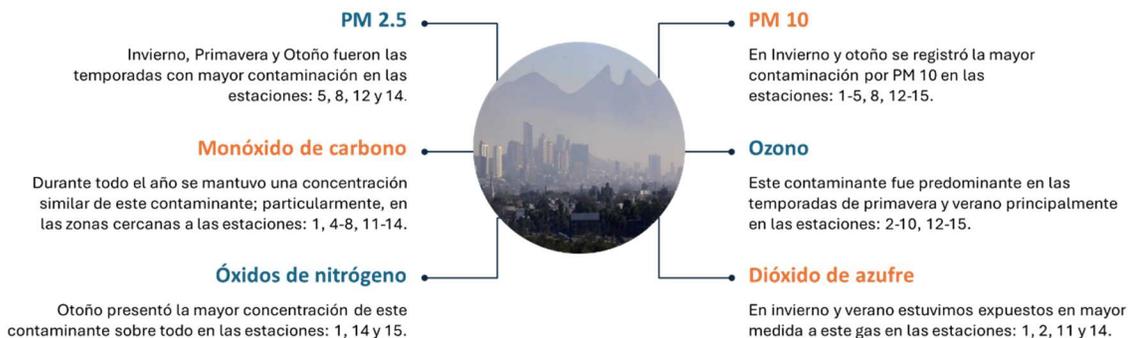


Fig. 3. Resumen de las temporadas y estaciones con mayor contaminación por contaminante en el AMM.

Tendencias de la contaminación del aire en 2024

Con el objetivo de analizar la posible variación de la concentración de los distintos contaminantes del aire, se realizó una prueba Tukey HSD (conocida por sus siglas en inglés *Honestly-significant-difference*) con el objetivo de hacer una comparación de medias de lo que va del año 2024 respecto a los años anteriores en una de las temporadas más contaminadas (invierno). Como se observa en la Tabla VI, no hubo una destacada variación al analizar la diferencia de medias de las concentraciones de los seis contaminantes. Se destaca la variación del año actual con 2022 para el CO, con el 2021 para O₃ y NO_x; mientras que no hubo diferencias significativas para el material particulado y el dióxido de azufre en la temporada de invierno durante el periodo de estudio.

Tabla 6. Comparación de medias de los contaminantes del aire en invierno durante 2021-2024.

Contaminante	Año actual	Años	Diferencia de medias	Error estándar	Valor-p
PM 2.5	2024	2021	3.4129	1.745	0.512
		2022	3.7111	1.745	0.438
		2023	2.9778	1.745	0.624
PM 10	2024	2021	6.8972	3.0159	0.372
		2022	5.173	3.0159	0.620
		2023	3.1159	3.0159	0.885
CO	2024	2021	0.3313	0.1487	0.396
		2022	0.733	0.1487	0.003*
		2023	0.4606	0.1487	0.130
O ₃	2024	2021	0.0107	0.0015	0.000*
		2022	0.0050	0.0015	0.094
		2023	0.0047	0.0015	0.122
NO _x	2024	2021	0.0193	0.0025	0.000*
		2022	0.0056	0.0025	0.381
		2023	0.0021	0.0025	0.933
SO ₂	2024	2021	0.0005	0.0006	0.9181
		2022	0.0001	0.0006	0.9986
		2023	0.0011	0.0006	0.5118

* Diferencia significativa ($\alpha=0.01$).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La contaminación del aire es un problema crítico de México y particularmente del área metropolitana de Monterrey debido a la urbanización, la industrialización, el número creciente (y no controlado) de vehículos, el uso de combustibles con alto contenido de nitrógeno y azufre, así como la falta de regulaciones ambientales. Por lo que, en esta investigación se realizó un análisis estadístico de las concentraciones de seis contaminantes criterio: PM 2.5, PM 10, CO, O₃, NO_x y SO₂, registradas en las diferentes estaciones de monitoreo ubicadas en el AMM en el periodo 2021 y 2023. A partir del análisis realizado, se destacan las siguientes observaciones:

- La concentración de los contaminantes O₃, CO, NO_x y SO₂ varió por año, temporada y la estación analizada; mientras que, la variación de la concentración del material particulado solo fue afectada por la temporada y la estación de monitoreo.
- La estación 14, ubicada en Santa Catarina, registró la mayor concentración de los contaminantes del aire. Lo que se relaciona con su alta actividad industrial.
- En el Obispado, la estación 8 es una de la que registra mayores índices de contaminación de material particulado, monóxido de carbono y ozono.
- Las temporadas con mayor índice de contaminación fueron invierno y otoño; a excepción del ozono que predominó en primavera y verano.
- El análisis de la temporada de invierno del 2021-2024 indicó que no hay cambios aparentes en la concentración de los contaminantes.
- La comparación de las concentraciones medias de los contaminantes (anuales) indicó que en el periodo de estudio se superó los límites recomendados por la OMS y la norma mexicana para el material particulado.

Estos resultados podrían servir como una guía para entender la distribución de la contaminación por zona, ya que el efecto de cada contaminante en el medio ambiente es distinto. Una vez que se conoce esto, es crítico iniciar a implementar estrategias para evitar daños a la salud de la población del AMM, el deterioro de especies vegetales, así como sus ecosistemas. Aunado a lo anterior, la contaminación también puede provocar daños en las edificaciones, causando pérdidas económicas. Por esta razón, es necesario implementar acciones específicas para cada una de las fuentes de contaminación mediante políticas y acuerdos que involucren a empresas contaminantes, gobierno y a la sociedad en general para que se destinen recursos humanos, tecnológicos y económicos en pro de mejorar la calidad del aire. A modo de ejemplo, se destaca un programa de verificación vehicular que sería de gran ayuda en el estado para coadyuvar a disminuir la contaminación del aire, particularmente de gases NO_x y SO₂.

REFERENCIAS

1. H. Suhendar, W. Indrasari, S. G. Muqita, I. G. A. Isnaini, Development of a Real-Time Gas Concentration Measurement System Using Internet of Things-Based Monitoring, *Jurnal Fisika dan Aplikasinya* 9(1) (2024) 1-12. <https://doi.org/10.21009/SPEKTRA>
2. S. Paraschiv, L. S. Paraschiv, Trends of carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels combustion (coal, gas and oil) in the EU member states from 1960 to 2018, 7th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2020, 14–18 September, ISEP, Porto, Portugal, *Energy Reports* 6(8) (2020) 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.116>

3. R. Gehrels, E. Garrett, Rising sea levels as an indicator of global change, *Climate Change Observed Impacts on Planet Earth*, *Climate Change* 3 (2021) 205-217. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00011-6>
4. T. Bein, C. Karagiannidis, M. Quintel, Climate change, global warming, and intensive care, *Understanding the Disease* 46 (2020) 485–487. <https://doi.org/10.1007/s00134-019-05888-4>.
5. W. Zhou, C. Chen, L. Lei, P. Fu, Y. Sun, Temporal variations and spatial distributions of gaseous and particulate air pollutants and their health risks during 2015–2019 in China, *Environmental Pollution* 272 (2021) 116031. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116031>
6. P. K. Hopke, Q. Dai, L. Li, Y. Feng, Global review of recent source apportionments for airborne particulate matter, *Science of The Total Environment* 740 (2020) 140091. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140091>
7. D.-E. Constantin, C. Bocăneala, M. Voiculescu, A. Roșu, A. Merlaud, M. Van Roozendaal, P. L. Georgescu, Evolution of SO₂ and NO_x Emissions from Several Large Combustion Plants in Europe during 2005–2015, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(10) (2020) 3630. <https://doi.org/10.3390/ijerph17103630>
8. S. Madronich, B. Sulzberger, J. D. Longstreth, T. Schikowski, M. P. Sulbæk Andersen, K. R. Solomon, S. R. Wilson, Changes in tropospheric air quality related to the protection of stratospheric ozone in a changing climate, *Photochemical & Photobiological Sciences* 22 (2023) 1129–1176. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-003369-6>
9. van der Gaast, W., Towards a Future Climate Policy—From the Kyoto Protocol to the Paris Agreement, in *International Climate Negotiation Factors: Design, Process, Tactics*. (2017), Springer International Publishing: Cham. p. 91-123. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46798-6>
10. S. Banacloche, M. A. Cadarso, F. Monsalve, Y. Lechon, Assessment of the sustainability of Mexico green investments in the road to Paris, *Energy Policy* 141 (2020) 111458. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111458>
11. SEMARNAT. Informe de Medio Ambiente. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (2018).
12. H. R. Rodríguez, M. H. Díaz, J. L. T. Sangrador, A. S. Halbinger, M. C. Lugo, S. J. Rothenberg, J. C. Cruz, E. F. Arellano, K. F. Rangel Moreno, L. A. de la Sierra, L. A. Luna Escobar, J. M. Avilés, M. B. Flores, Contaminación del aire en zonas urbanas y salud. Instituto Nacional de Salud Pública (2017) 1-7.
13. J. A. Silva Rodríguez de San Miguel, Management of air pollution in Mexico, *Management of Environmental Quality: An International Journal* 30(3) (2019) 578-592. <https://doi.org/10.1108/MEQ-05-2018-0099>
14. SEMARNAT. Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire ProAire (2024). <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>
15. J. Leal-Iga, Efectos físicos de la contaminación atmosférica percibidos de manera inconsciente por la ciudadanía, en el área metropolitana de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. *Revista de Salud Pública* 21 (2023) 423-429. <https://doi.org/10.15446/rsap.V21n4.74959>
16. Secretaría de Economía. (2020). Monterrey. Data México.
17. Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Nuevo León. (2023). Programa Integral de Gestión de Calidad del Aire (PIGECA) 2023-2033.
18. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) (mayo 2024).
19. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). NOM-156-SEMARNAT-2021: Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.
20. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del Estado de Nuevo León, ProAire 2016-2025. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

21. M. Ferretti, M. Cailleret, M. Haeni, V. Trotsiuk, V. Apuhtin, V. Araminiene, V. Buriánek, S. Cecchini, L. Dalstein-Richier, I. Hůnová, T. Jakovljević, K. Kaoukis, J. Neiryneck, M. Nicolas, A.-K. Prescher, R. Novotný, H. Pavlendova, N. Potočić, M. Rupel, A. Russ, M. Schaub, The fingerprint of tropospheric ozone on broadleaved forest vegetation in Europe, *Ecological Indicators* 158 (2024) 111486. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111486>
22. T. Grøntoft, Estimation of Damage Cost to Building Façades per kilo Emission of Air Pollution in Norway, *Atmosphere* 11(7) (2020) 686. <https://doi.org/10.3390/atmos11070686>