

RIESGO A LA SALUD DE LA POBLACIÓN POR INHALACIÓN DE PM_{2.5} EN LA REPÚBLICA MEXICANA

Risk to the health of the population by inhalation of PM_{2.5} from the atmosphere in Mexico

Angélica FLORES ORTIZ¹, José LÓPEZ MONROY²,
María de la Luz JIMÉNEZ NÚÑEZ¹, Raúl Venancio DÍAZ GODOY^{2*},
Ana Laura MARTÍNEZ JIMÉNEZ¹ y María de los Ángeles LLANES NEVÁREZ¹

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Avenida Tecnológico s/n, Colonia Agrícola Bellavista, 52149 Metepec, Estado de México, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, 52750 Ocoyoacac, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia: raul.diaz@inin.gob.mx

(Recibido: marzo de 2022; aceptado: mayo de 2023)

Palabras clave: contaminación atmosférica, rosa de vientos, dirección del viento, velocidad del viento, distribución de frecuencia, redes de monitoreo.

RESUMEN

México no está exento de la creciente preocupación mundial por el incremento de la contaminación atmosférica y sus efectos nocivos para la salud, por lo que el objetivo del presente trabajo es determinar el índice de riesgo a la salud por inhalación de partículas suspendidas menores a 2.5 µm (PM_{2.5}) presentes en la atmósfera de la República Mexicana. Para ello, se revisó la cantidad de redes de monitoreo atmosférico que existen en la república (36) y cuántas de ellas contaban con datos disponibles sobre PM_{2.5} (9), así como con datos meteorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura) durante el periodo 2016-2019. Se elaboraron cuadros de datos para cada una de las redes de los estados de la república y con ellas se determinó el comportamiento espacial de las PM_{2.5} y de las variables meteorológicas. Se calculó el índice de riesgo a la salud y se determinó que los sitios con mayor índice de riesgo por inhalación de PM_{2.5} fueron, en primer lugar, San Cristóbal en el Estado de México, y en segundo lugar Xalostoc en la Ciudad de México.

Key words: air pollution, wind rose, wind direction, wind speed, frequency distribution, monitoring networks.

ABSTRACT

Mexico is not exempt from the growing global concern about the increase in air pollution and its harmful effects on health. Therefore, this study aims to determine the health risk index for PM_{2.5} inhalation present in Mexico's atmosphere. To this end, the number of atmospheric monitoring networks in the country (36) was reviewed, and how many of them had available data on PM_{2.5} (9), as well as meteorological data (wind direction and speed, temperature) during the period 2016-2019. Data tables were produced for each monitoring network, and the spatial behavior and meteorological variables of PM_{2.5} were determined. The health risk index was calculated, and it was determined that the sites with the highest risk index for PM_{2.5} inhalation in Mexico were, first, San Cristóbal in the State of Mexico and second, Xalostoc in Mexico City.

INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que cerca de siete millones de personas mueren cada año por la exposición a partículas finas suspendidas en el aire, con lo que puede asegurarse que la contaminación atmosférica es uno de los principales problemas a los que se enfrenta actualmente el ser humano, ya que sus niveles han ido en aumento durante las últimas décadas (OMS 2018).

A los contaminantes que afectan la salud humana y los ecosistemas se les conoce como contaminantes criterio, por lo cual se han establecido normas y niveles máximos de concentración en el aire para cada uno de ellos (COFEPRIS 2017). Los contaminantes criterio son ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas (PM) con diámetros aerodinámicos $< 10 \mu m$ (PM_{10}) y $\leq 2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2). Con el objetivo de evaluar y determinar la calidad del aire en los estados de la República Mexicana se establecieron redes de estaciones de monitoreo atmosférico en las cuales existen instrumentos de medición que permiten determinar la concentración de dichos contaminantes (SINAICA 2021).

En diversos países se han realizado estudios sobre estos contaminantes: Zhou et al. (2021) investigaron las variaciones temporales y las distribuciones espaciales de seis contaminantes criterio (SO_2 , NO_2 , O_3 , CO, $PM_{2.5}$ y PM_{10}) en Pekín-Tianjin-Hebei (BTH), el Delta del Río Yangtze (YRD) y el Delta del Río Perla (PRD) durante 2015-2019. Asumiendo que sólo los contaminantes atmosféricos cuyas concentraciones superan determinados umbrales ejercen un exceso de riesgo (ER_{total}) de mortalidad, encontraron en general que las $PM_{2.5}$ dominaron el ER_{total} , representando el 42-53 % en BTH y el 58-64 % en YRD, con contribuciones en constante aumento; sin embargo, el ER_{total} presentó una fuerte dependencia estacional de los contaminantes atmosféricos, con una mayor contribución del O_3 en verano. El ER_{total} ocasionado por SO_2 se redujo sustancialmente y llegó a ser insignificante excepto en invierno en BTH, mientras que el NO_2 sólo desempeñó un papel significativo en invierno. También se observó que el $ER_{PM_{2.5}}$, exceso de riesgo originado por las $PM_{2.5}$, dependía de la composición, siendo los compuestos orgánicos volátiles los que más contribuían para un $ER_{PM_{2.5}}$ bajo, mientras el $ER_{PM_{2.5}}$ fue alto cuando el nitrato contribuía más. Los resultados ponen de manifiesto que la evaluación de riesgos a la salud pública por contaminación atmosférica debe tener en cuenta las diferencias químicas de las PM en las distintas

regiones, además de los contaminantes atmosféricos dominantes en las distintas épocas del año.

Barzeghar et al. (2019) estimaron que los porcentajes atribuibles a la exposición a PM_{10} a largo plazo se situaban entre el 7.9 y el 28.7 % para mortalidad infantil postneonatal y entre el 20.7 y el 61.5 % para incidencia de bronquitis crónica en adultos. A la exposición a largo plazo a $PM_{2.5}$ se le atribuyó un 11.8 % de mortalidad por todas las causas, un 34.6 % de cardiopatía isquémica, un 26.7 % de accidente cerebrovascular, un 23.4 % de enfermedad pulmonar obstructiva crónica, un 24.2 % de infección respiratoria inferior aguda y un 16.5 % de mortalidad por cáncer de pulmón.

Hadei et al. (2017) evaluaron los impactos a la salud en el corto plazo por efecto de la contaminación del aire en Teherán utilizando el modelo AirQ 2.2.3 de marzo de 2013 a marzo de 2016. Las concentraciones horarias de PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 y SO_2 se obtuvieron del Departamento de Medio Ambiente (DOE) y de la Compañía de Control de la Calidad del Aire de Teherán (TAQCC). La media trienal (\pm desviación estándar) de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ fue de 80.21 (\pm 34.21) y 39.17 (\pm 17.26) $\mu g/m^3$, respectivamente. Las medias trienales (\pm desviación estándar) de O_3 , NO_2 y SO_2 fueron de 54.88 (\pm 24.15), 103.97 (\pm 25.88) y 39.84 (\pm 11.17) $\mu g/m^3$, respectivamente. El número total estimado de muertes atribuidas a los contaminantes criterio durante los tres años fueron: 4192 (PM_{10}), 4336 ($PM_{2.5}$), 1363 (O_3), 2830 (NO_2) y 1216 (SO_2).

Figueroa et al. (2016) llevaron a cabo un estudio de PM_{10} y O_3 como factores de riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y neumonía en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. Realizaron una asociación con registros de enfermedades por neumonía en la población. Los resultados del estudio mostraron que la exposición a contaminación por partículas tiende a afectar mayormente a personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, niños y adultos mayores.

En un estudio realizado en Guangzhou, China, Bu et al. (2021) determinaron que la concentración horaria de $PM_{2.5}$ tendía a aumentar cuando la humedad relativa era > 50 %, la intensidad de las precipitaciones horarias era ≤ 0.6 mm/h o la velocidad del viento era ≤ 1.8 m/s. La concentración diaria máxima de O_3 promedio en 8 h tendía a aumentar cuando la duración de la insolación era > 4 h, la temperatura máxima era > 29 °C o la velocidad media diaria del viento era ≤ 1.8 m/s. La dirección del viento también era un factor crucial, ya que Guangzhou solía experimentar una grave contaminación atmosférica cuando

predominaban los vientos del oeste. Estos resultados permiten comprender mejor la relación entre las condiciones meteorológicas y las concentraciones de contaminantes. Las variables meteorológicas pueden utilizarse para predecir la calidad del aire o comparar los efectos del tiempo en la contaminación entre diferentes años.

Kermani et al. (2020) evaluaron la relación entre la concentración de PM_{2.5} y las variables meteorológicas, mostrando en sus resultados que existe una correlación positiva entre la concentración de partículas PM_{2.5} y la temperatura, la humedad relativa y la presión ($p < 0.05$). Además, encontraron una correlación débil y negativa entre la radiación UV, la nubosidad y el punto de rocío con la concentración de partículas PM_{2.5} ($p > 0.05$).

En un estudio realizado en la provincia de Mae Hong Son, Tailandia, Kliengchuay et al. (2018) establecieron que las variables meteorológicas desempeñan un papel importante en la prevalencia de las PM en el ambiente, con el objetivo de establecer las relaciones entre las variables meteorológicas y las concentraciones ambientales de PM₁₀. Los resultados de este estudio indicaron que la variabilidad meteorológica local influye en las PM₁₀. La mayor concentración ocurrió durante la estación seca y las estaciones del monzón del noreste. Las concentraciones máximas siempre se observaron en marzo. Las concentraciones de PM₁₀ se relacionaron significativamente con las de CO y O₃ y con la humedad relativa.

Por su parte, Liu et al. (2020) reportaron que la influencia de las condiciones meteorológicas en la concentración de contaminantes del aire depende del tipo de contaminante y de la región de origen. Excepto por el O₃, la concentración de otros contaminantes del aire (como PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, CO, NO₂) en la mayoría de los sitios de China se correlacionó significativa y negativamente con la velocidad media del viento, la precipitación y la humedad relativa, pero positivamente con la presión atmosférica.

De ahí la importancia de contar con estaciones de monitoreo en las distintas ciudades del mundo, ya que monitorear las condiciones meteorológicas en un área determinada permite conocer su comportamiento y correlación con los contaminantes, con el fin de adoptar medidas para disminuir el riesgo que representan para la salud. Aunque en la mayoría de las estaciones la concentración de contaminantes atmosféricos se vio afectada por múltiples factores meteorológicos, el grado de impacto dependió del tipo de contaminante y la ubicación geográfica de las estaciones.

En este trabajo se analizó el comportamiento de las PM_{2.5} en la República Mexicana con el propósito de determinar el grado de contaminación en cada entidad federativa a partir de la concentración de PM_{2.5} medida en cada estación de monitoreo atmosférico. Con ello fue posible conocer los estados con mayor concentración de PM_{2.5} y sus tendencias, así como calcular el índice de riesgo (IR) a la salud de la población en territorio mexicano por inhalación de PM_{2.5}.

METODOLOGÍA

Ubicación de las redes de monitoreo atmosférico en la República Mexicana

La información utilizada para el desarrollo de este trabajo fue proporcionada por el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). En la **figura 1** se muestran los estados de la República Mexicana considerados para el estudio y en el **cuadro I** las redes de monitoreo de cada estado de la república, así como el número de estaciones que las conforman. Se consideraron los sitios que contaban con información de 2016 a 2019 tanto para las variables meteorológicas velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV) y temperatura (T), como para la concentración horaria anual de PM_{2.5} por estación (INECC 2020). Una vez analizada la consistencia de los datos se integraron cuadros con las concentraciones gravimétricas para PM_{2.5} y las variables meteorológicas las redes de monitoreo atmosférico para cada estado. Para determinar el comportamiento de las PM_{2.5} durante el periodo de estudio, se realizaron graficas de comportamiento por estado.

Se elaboraron rosas de vientos utilizando el programa WRPLOT (LS 2018) de los sitios que obtuvieron el mayor IR por inhalación de PM_{2.5} en los años de estudio, estas fueron georreferenciadas con el programa Google Earth Pro (GE 2021). En éstas se observa cuál es la dirección predominante del viento y su origen, así como la frecuencia con que sopló en cada dirección.

Cálculo del índice de riesgo a la salud por inhalación de la concentración gravimétrica de PM_{2.5}

Se calculó el IR para la salud humana considerando como dosis de referencia el límite máximo permisible anual de PM_{2.5}, que es de 12 µg/m³ (SSA 2014) así como el percentil anual 98 de la concentración gravimétrica de PM_{2.5} de los sitios en estudio. El cálculo se realizó considerando la siguiente expresión (USEPA 2016, ATSDR 2019a, b, OMS 2018):

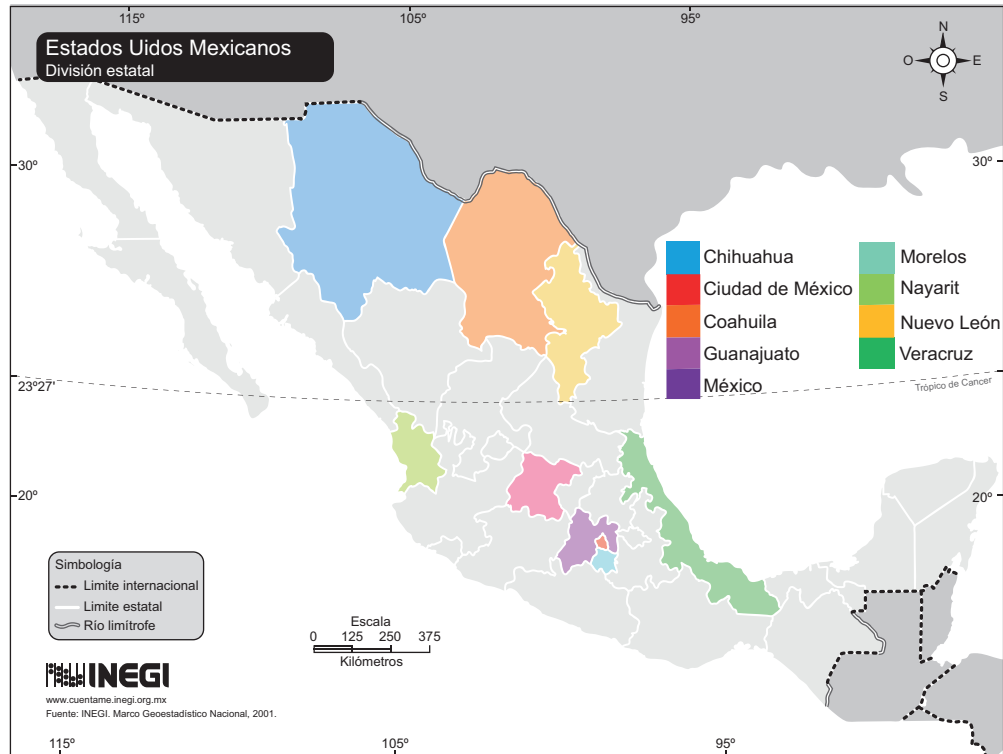


Fig. 1. Estados de la República Mexicana seleccionados para la investigación. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI (2021).

$$\text{Índice de riesgo (IR)} = \frac{\text{Dosis de exposición } (\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\text{Dosis de referencia } (\mu\text{g}/\text{m}^3)} \quad (1)$$

RESULTADOS

Determinación del comportamiento de las $\text{PM}_{2.5}$ en cada estado de la República Mexicana (2016-2019)

Una vez integrada la base de datos del contaminante criterio $\text{PM}_{2.5}$ se realizaron gráficos de su comportamiento para los estados de la República Mexicana incluidos en el estudio que contaban con la información requerida (Chihuahua, Ciudad de México, Coahuila, Guanajuato, Estado de México, Morelos, Nayarit, Nuevo León y Veracruz).

Gráficos de comportamiento de $\text{PM}_{2.5}$ en el periodo 2016-2019

En el estado de Chihuahua, las $\text{PM}_{2.5}$ rebasaron los límites máximos permisibles, tanto por día como anualmente, durante la mayor parte del periodo 2016-2019 (**Fig. 2**). Las concentraciones más altas

aparecieron en mayo (2016-2018), lo cual de acuerdo con la plataforma Weather Spark (WS 2021, INEGI 2022) se debe a que mayo es el mes de mayor calma con relación a vientos.

En la Ciudad de México, las $\text{PM}_{2.5}$ (**Fig. 3**) excedieron los límites máximos permisibles (horarios y anuales) en todo el periodo. Los meses de mayor concentración fueron de noviembre a marzo, que corresponden a la época seca-fría. El registro más alto de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ correspondió a la estación San Agustín en febrero de 2016. Marzo y mayo son cálidos, siendo el segundo el más caluroso del año con algunas probabilidades de lluvia (WS 2021, INEGI 2022). Las temporadas de menor concentración correspondieron a los meses con mayor viento y temperatura, e incluso a la época de lluvias.

En el estado de Coahuila, el límite máximo permisible de $\text{PM}_{2.5}$ (**Fig. 4**), tanto horario como anual, fue rebasado todos los años en la estación Finanzas. Los picos más altos se observaron en diciembre de 2016, septiembre de 2017, abril de 2018 y octubre de 2019. La época templada se presenta del 22 de abril al 31 de agosto, y la más cálida en junio. La temporada seca-fría va del 4 de diciembre a febrero, siendo enero el

CUADRO I. ESTACIONES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO, 2016-2019.

Estado	SMCA	Red	Estación
Chihuahua	Chihuahua-estatal	CHIH1	Sur
			Ajusco Medio
			Ajusco
			Benito Juárez
			Gustavo A. Madero
			Hospital General de México
			Merced
Ciudad de México	Ciudad de México	Valle de México	Miguel Hidalgo
			Nezahualcóyotl
			San Agustín
			Santa Fe
			Tlalnepantla
			Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco
			Xalostoc
Coahuila de Zaragoza	Coahuila	Saltillo	Finanzas
		Monclova	Jurisdicción Sanitaria
		Piedras Negras	Centro de rehabilitación DIF
		Celaya	Policía
			San Juanico
Guanajuato	Guanajuato	Irapuato	Teódula
		León	Cámara de la Industria del Calzado del Estado de Guanajuato-Bomberos
		Salamanca	Cruz Roja
			Ceboruco
			Toluca Centro
México	México	Toluca	Metepec
			Oxtotitlán
			San Cristobal
			San Mateo Atenco
Morelos	Morelos	Cuernavaca	Cuernavaca 01
Nayarit	Nayarit	Tepic	Tecnológico de Tepic
			Primaria Julian Gascón Mercado
Nuevo León	Nuevo León	Monterrey	La Pastora
			Santa Catarina
Veracruz de Ignacio de la Llave	Veracruz	Minatitlán	Tecnológico
		Xalapa	Secretaría del Trabajo y Previsión Social
		Poza Rica	Universidad Veracruzana

Fuente: Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). SMCA: Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire. DIF: Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia.

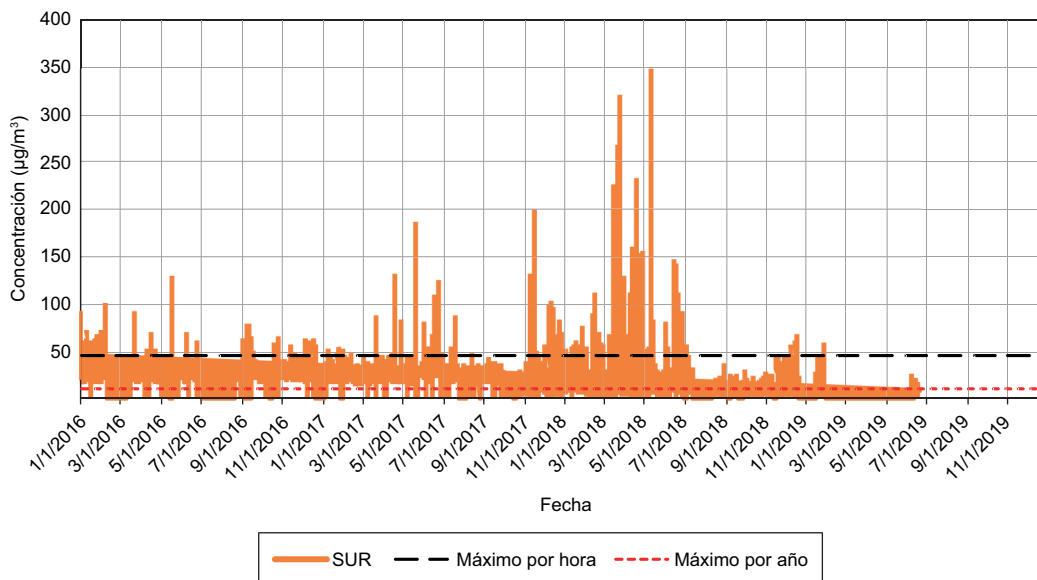


Fig. 2. Comportamiento de las PM_{2.5} en el estado de Chihuahua, 2016-2019. Estación: Sur (SUR).

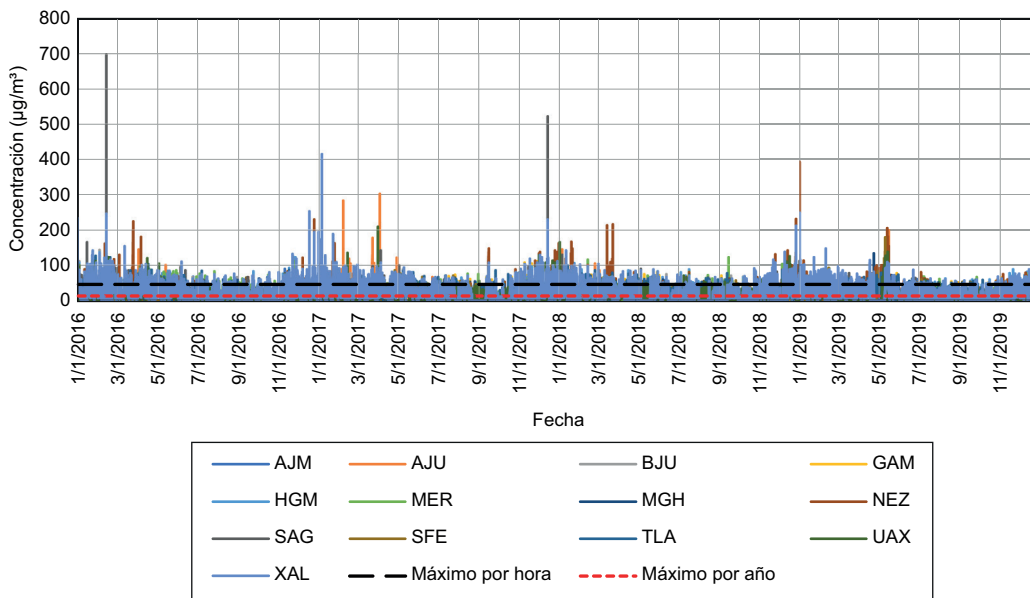


Fig. 3. Comportamiento de las PM_{2.5} en la Ciudad de México, 2016-2019. Estaciones: Ajusco Medio (AJM), Hospital General de México (HGM), San Agustín (SAG), Xalostoc (XAL), Ajusco (AJU), Merced (MER), Santa Fe (SFE), Benito Juárez (BJU), Miguel Hidalgo (MGH), Tlalnepantla (TLA), Gustavo A. Madero (GAM), Nezahualcóyotl (NEZ), Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco (UAX).

mes más frío (WS 2021, INEGI 2022). En contraste con la Ciudad de México y el Estado de México, en la época fría no se reflejan altas concentraciones.

En Guanajuato, las PM_{2.5} (Fig. 5) excedieron los límites horario y anual durante todo el periodo. Los registros más altos de concentración para la temporada de estudio se observaron en la época seca-fría.

Durante los cuatro años de estudio, la concentración más alta de PM_{2.5} se presentó el 1 de enero en la estación Teódula. Mayo y junio son calurosos y diciembre y enero se caracterizan por ser fríos, lo cual refleja que en la época seca-fría se presentan las mayores concentraciones y en la calurosa las menores (WS 2021, INEGI 2022).

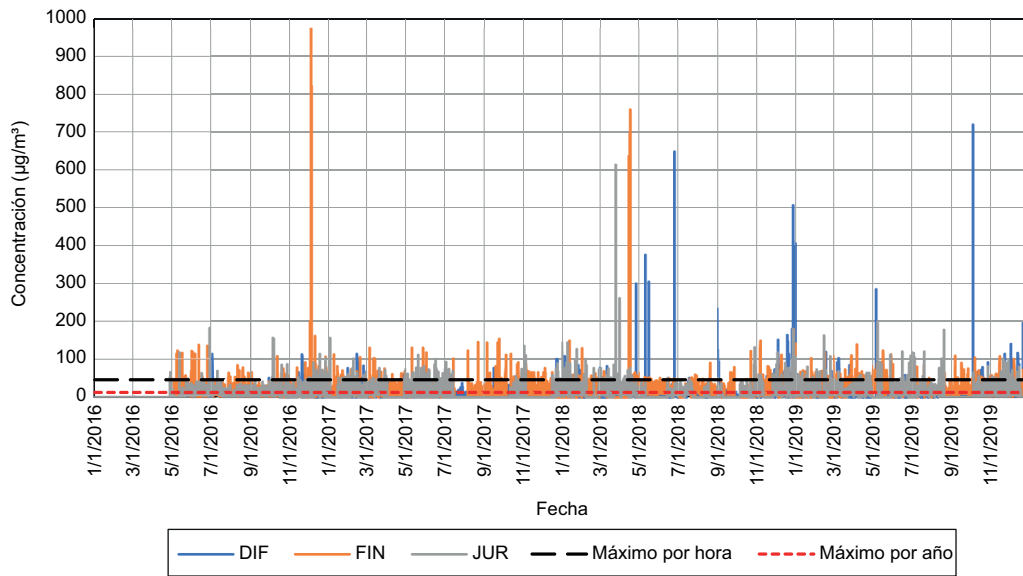


Fig. 4. Comportamiento de las PM_{2.5} en el estado de Coahuila, 2016-2019. Estaciones: Centro de Rehabilitación DIF (DIF), Finanzas (FIN), Jurisdicción Sanitaria (JUR).

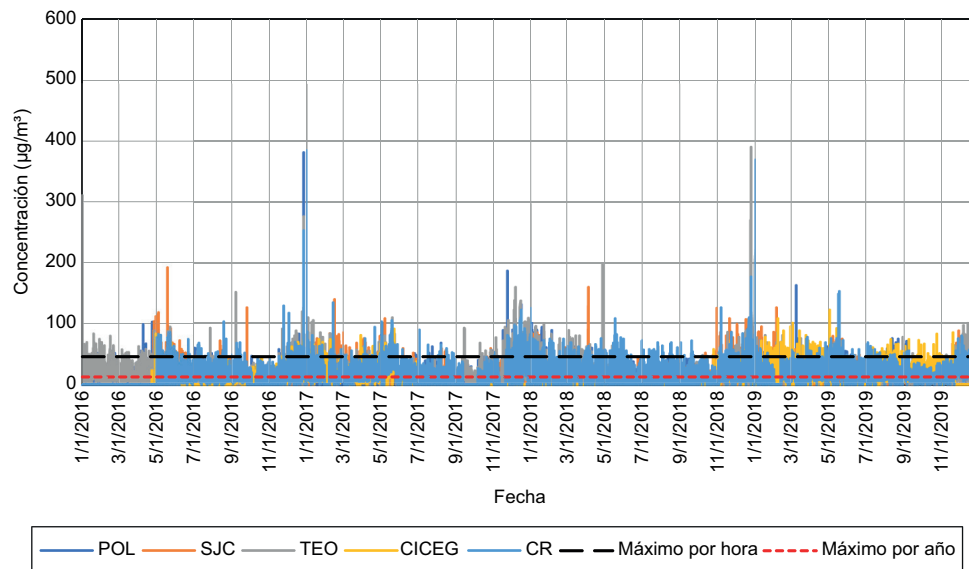


Fig. 5. Comportamiento de las PM_{2.5} en el estado de Guanajuato, 2016-2019. Estaciones: Policía (POL), Cruz Roja (CR), San Juanico (SJC), Teóduła (TEO), Cámara de la Industria del Calzado del Estado de Guanajuato-Bomberos (CICEG).

En el Estado de México (**Fig. 6**) los límites diario y anual se rebasaron durante todo el periodo de estudio. En la época seca-fría se registraron las mayores concentraciones de PM_{2.5}, destacando la estación San Cristóbal en diciembre de 2019. En la época seca-caliente, así como en los meses con lluvia (abril a noviembre), las concentraciones disminuyeron.

En el estado de Morelos, los límites diario y anual de PM_{2.5} se excedieron durante todo el periodo 2016-2019 (**Fig. 7**). Las concentraciones más altas se registraron en septiembre de 2016, abril de 2017, marzo de 2018 y mayo de 2019, destacando marzo de 2018 como el mes en que se observó la concentración más alta de los cuatro años, lo

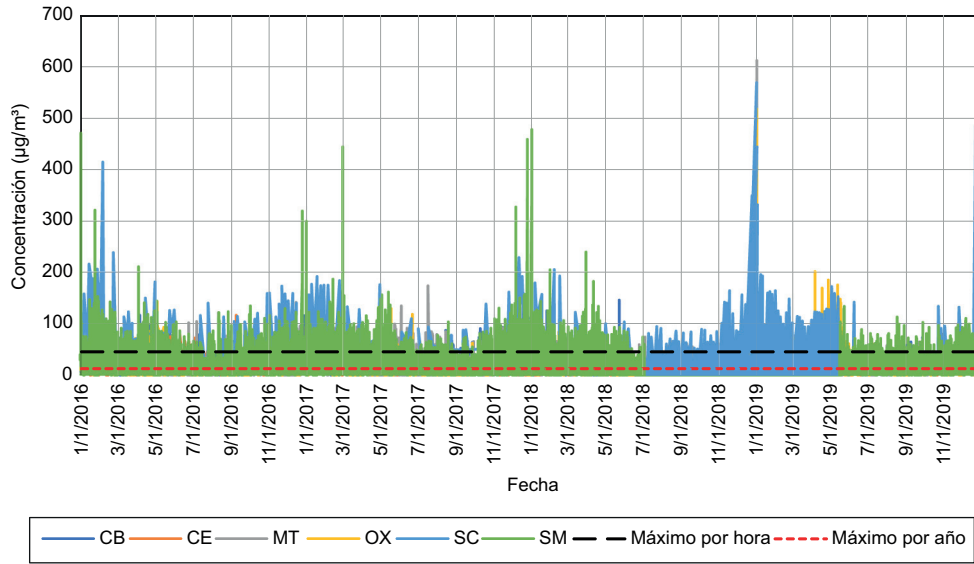


Fig. 6. Comportamiento de las PM_{2.5} en el Estado de México, 2016-2019. Estaciones: Ceboruco (CB), San Cristóbal (SC), Toluca Centro (CE), San Mateo Atenco (SM), Metepec (MT), Oxtotitlán (OX).

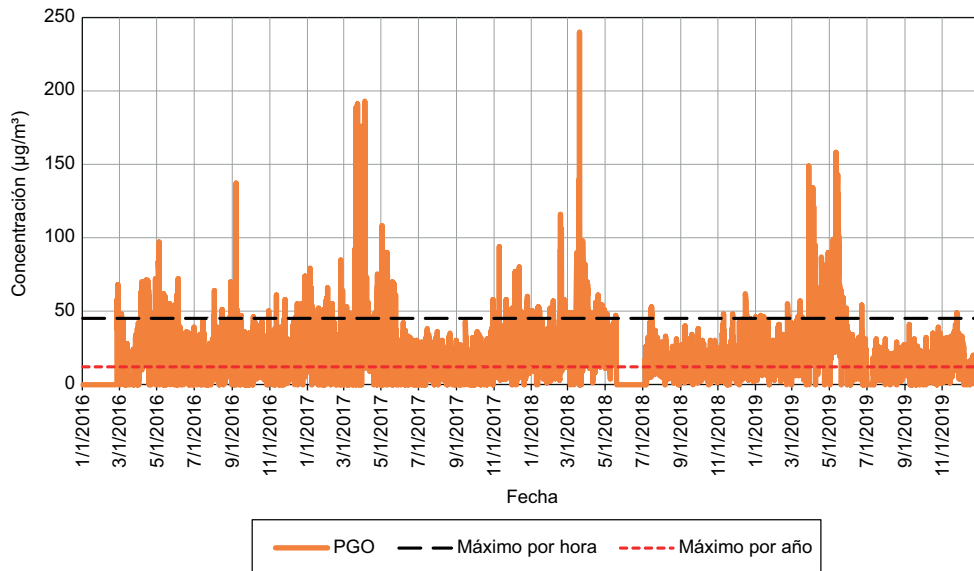


Fig. 7. Comportamiento de las PM_{2.5} en el estado de Morelos, 2016-2019. Estación: Cuernavaca 01 (PGO).

cual probablemente se deba a las celebraciones religiosas dedicadas a San José, patrono de la parroquia de San José (El Calvario) en Cuernavaca. A diferencia de otros estados, las concentraciones máximas de PM_{2.5} en Morelos no se presentan en la época seca-fría.

En Nayarit las concentraciones de PM_{2.5} (Fig. 8) excedieron los límites máximos tanto anuales como

diarios. En el periodo se observa un comportamiento cíclico de octubre de un año a septiembre del año siguiente, comportamiento que presenta las concentraciones más altas. En cada ciclo para la estación Primaria Julián Gascón Mercado se observa un pico de máxima concentración que corresponde a los meses de mayo que registraron las máximas temperaturas (35 °C) (WS 2021, INEGI 2022). Es probable

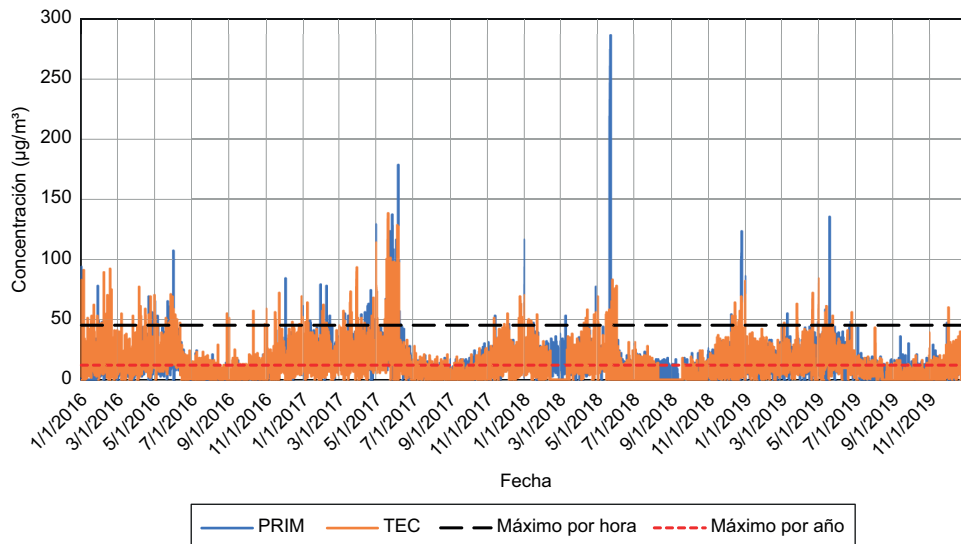


Fig. 8. Comportamiento de las PM_{2.5} en el estado de Nayarit, 2016-2019. Estaciones: Primaria Julián Gascón Mercado (PRIM), Tecnológico de Tepic (TEC).

que esto se deba al entorno polvoso, ya que dicha estación está ubicada en una zona no pavimentada.

En el estado de Nuevo León, ambos límites (horario y anual) para las PM_{2.5} (**Fig. 9**) fueron excedidos durante todo el periodo 2016-2019. De 2016 a la mitad de 2018 la concentración permaneció constante, observándose los registros más altos durante la época seca-fría (noviembre-enero). En la estación

Santa Catarina se registró una alta concentración de septiembre de 2018 a marzo de 2019. El clima seco y semiseco es el predominante en el estado (INEGI 2022).

En el estado de Veracruz, el límite máximo permisible de PM_{2.5}, tanto horario como anual (**Fig. 10**), fue excedido durante todo el periodo de estudio. Las mayores concentraciones se presentaron en la época

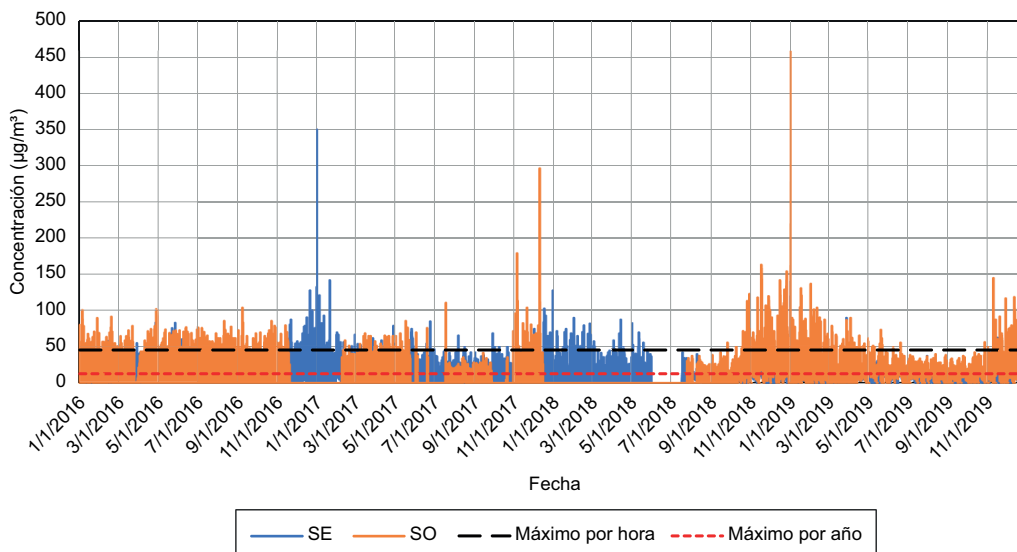


Fig. 9. Comportamiento de las PM_{2.5} en el estado de Nuevo León, 2016-2019. Estaciones: La Pastora (SE), Santa Catarina (SO).

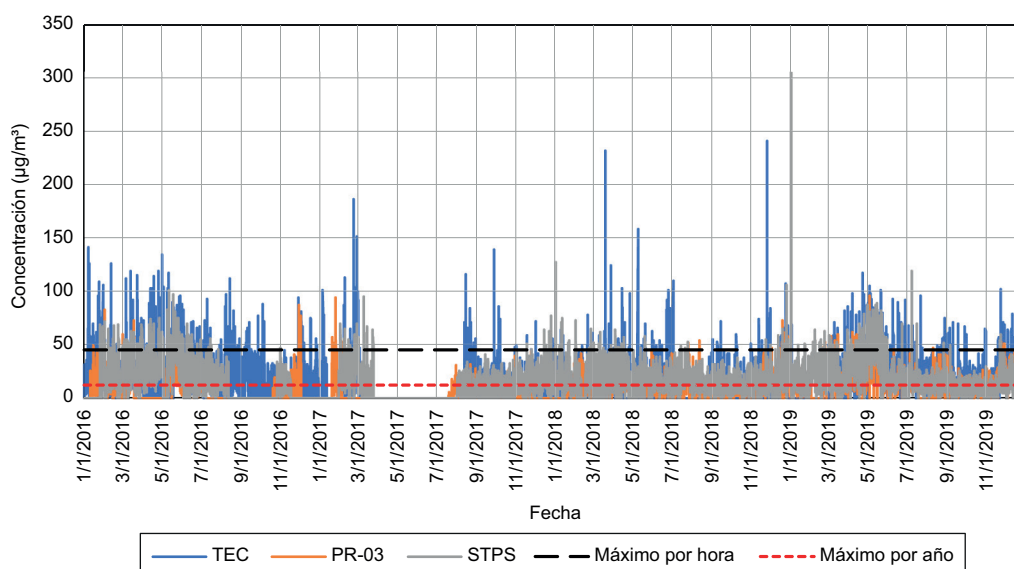


Fig. 10. Comportamiento de las $PM_{2.5}$ en el estado de Veracruz, 2016-2019. Estaciones: Tecnológico (TEC), Universidad Veracruzana (PR-03), Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS).

seca-fría, con un máximo en enero de 2019 en la estación Secretaría del Trabajo y Previsión Social. Los climas que predominan en el estado son cálido subhúmedo y cálido húmedo (INEGI 2022).

Determinación de rosas de vientos para el periodo 2016-2019 en los sitios de estudio

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la metodología previamente explicada, en las **figuras 11-19** se presentan rosas de vientos para los sitios en que se determinó el mayor índice de riesgo por inhalación de $PM_{2.5}$, junto con una gráfica de frecuencia de distribución de vientos:

- En la estación Sur del estado de Chihuahua el viento predominante durante el 2018 fue del norte y la mayor frecuencia fue de 99.7 % con un intervalo de velocidad mayor o igual a 11.1 m/s (**Fig. 11**).
- En la estación Xalostoc de la Ciudad de México, el viento predominante durante 2017 fue del noreste. La mayor frecuencia fue de 30.6 % con un intervalo de velocidad mayor o igual a 11.1 m/s (**Fig. 12**).
- En la estación Finanzas del estado de Coahuila el viento predominante durante 2019 fue del noreste. La frecuencia para este año fue de 62.3 % con un intervalo de velocidad de 0.5 a 2.1 m/s (**Fig. 13**).
- En la estación Teóquila del estado de Guanajuato el viento predominante durante 2017 fue del este y la mayor frecuencia fue de 50.5 %, con un intervalo de velocidad de 0.5 a 2.1 m/s (**Fig. 14**).

- En la estación San Cristóbal del Estado de México el viento predominante durante 2017 fue del norte y la mayor frecuencia fue de 64.7 %, con un intervalo de velocidad de 0.5 a 2.1 m/s (**Fig. 15**).
- En la estación Cuernavaca 01 del estado de Morelos el viento predominante en 2019 fue del noreste. La frecuencia mayor fue de 42.4 % con un intervalo de velocidad de 3.6 a 6.7 m/s. (**Fig. 16**).
- En la estación Primaria Julián Gascón Mercado del estado de Nayarit el viento predominante en 2017 fue del noroeste. La mayor frecuencia fue de 63.1 % con un rango de velocidad de 0.5 a 2.1 m/s (**Fig. 17**).
- En la estación Santa Catarina del estado de Nuevo León el viento predominante en 2019 fue del norte. La frecuencia mayor fue de 25.5 % con un rango de velocidad > 11.1 m/s (**Fig. 18**).
- En la estación Tecnológico del estado de Veracruz el viento predominante en 2016 fue del noreste. La mayor frecuencia del viento fue de 44.1 % con un rango de velocidad de 0.5 a 2.1 m/s (**Fig. 19**).

Cálculo del índice de riesgo a la salud por inhalación de acuerdo con la concentración gravimétrica de $PM_{2.5}$

De acuerdo con lo descrito en la metodología, se consideró el percentil 98 de la base de datos para la concentración gravimétrica de $PM_{2.5}$, con el fin de

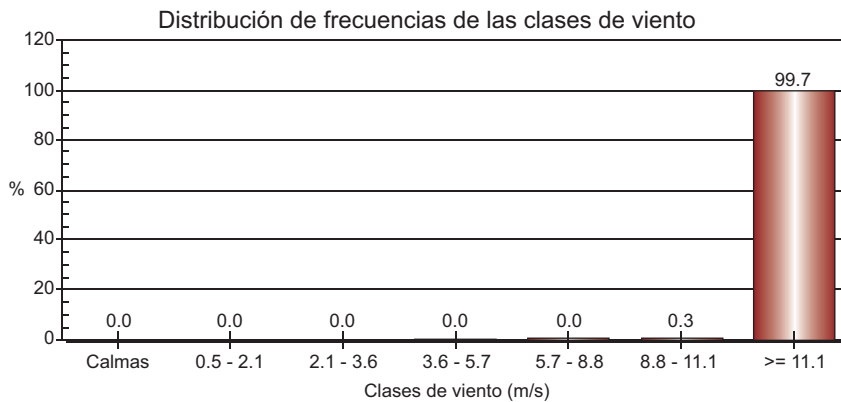
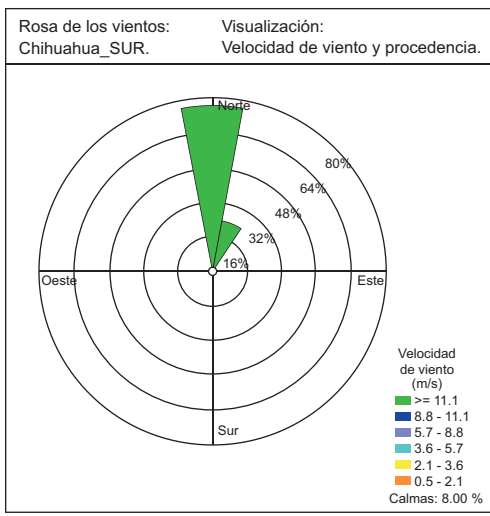


Fig. 11. Rosa de viento de la estación Sur, en el estado de Chihuahua (2018). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

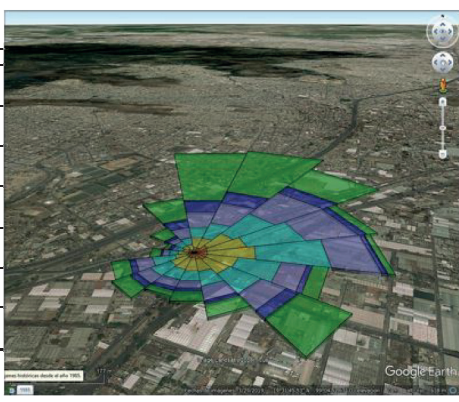
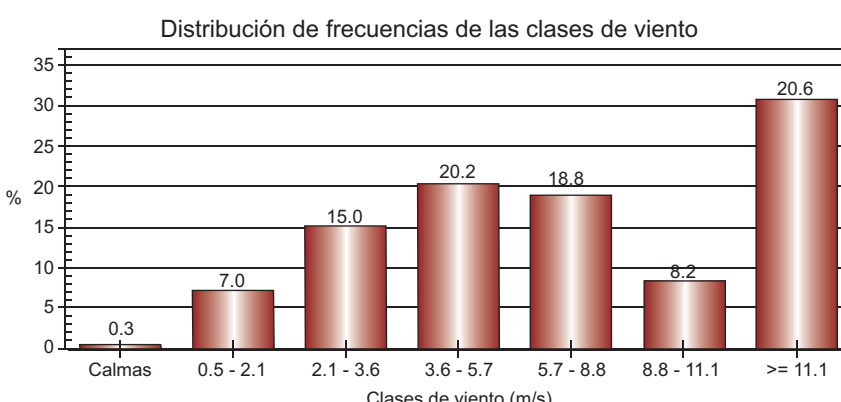
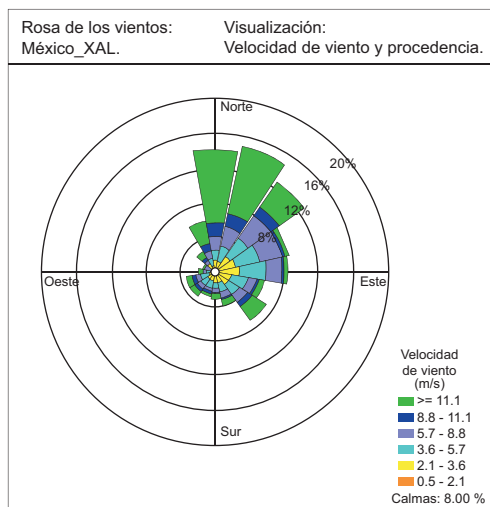


Fig. 12. Rosa de viento de la estación Xalostoc en la Ciudad de México (2017). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

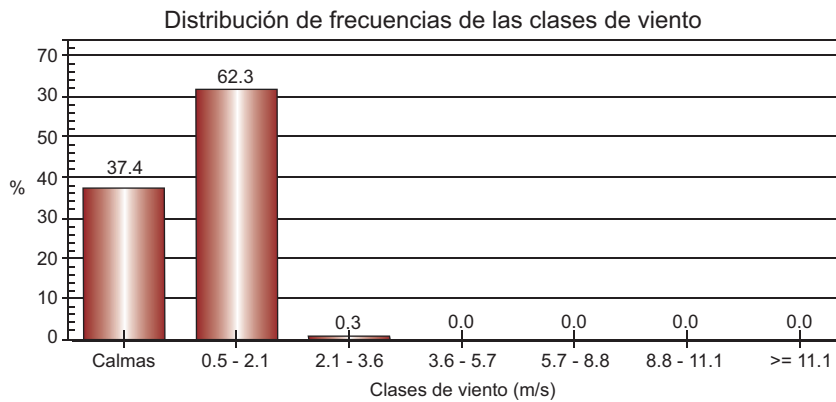
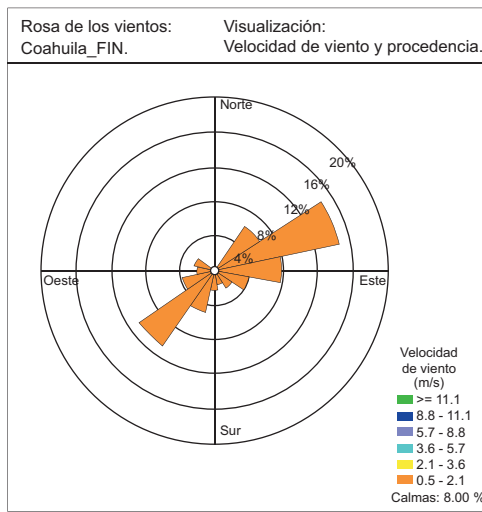


Fig. 13. Rosa de viento de la estación Finanzas en el estado de Coahuila (2019). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

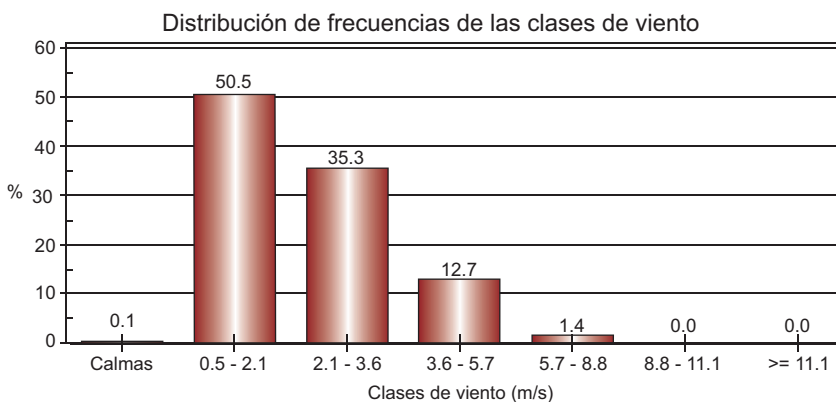
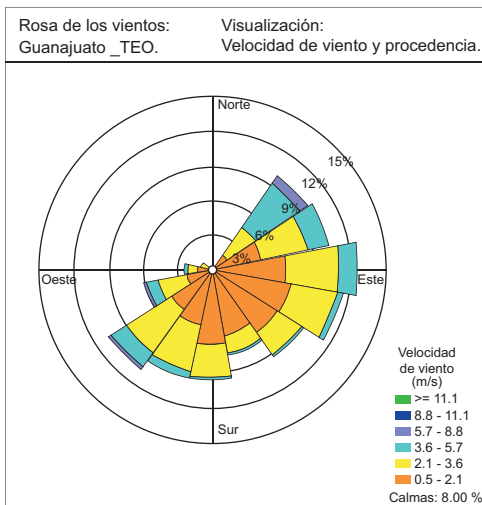


Fig. 14. Rosa de viento de la estación Teóquila en el estado de Guanajuato (2017). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

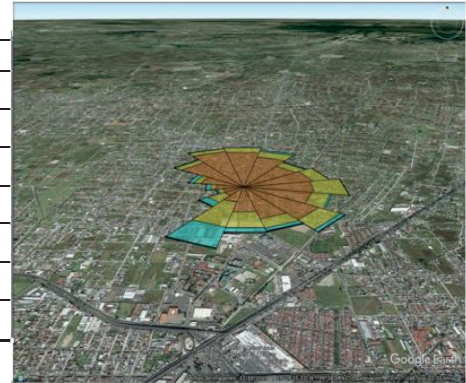
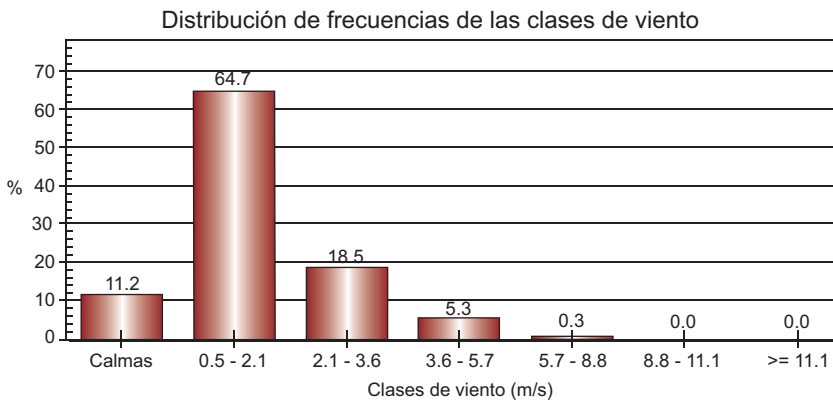
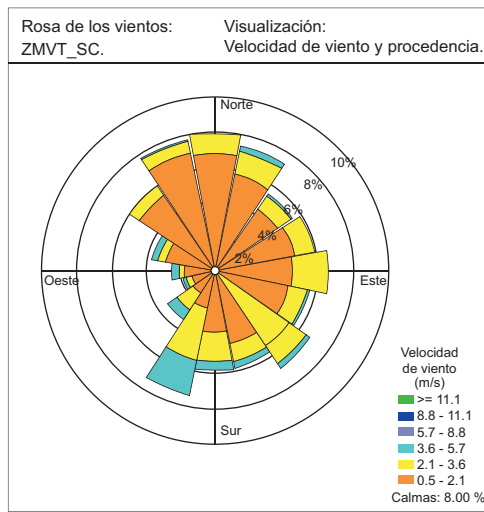


Fig. 15. Rosa de viento de la estación San Cristóbal en el Estado de México (2017). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

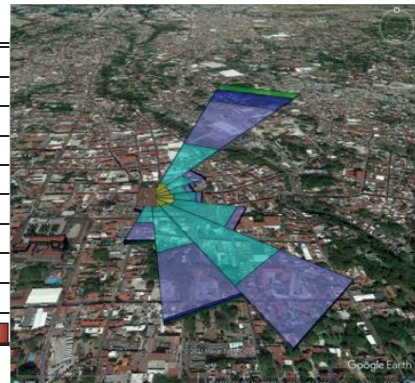
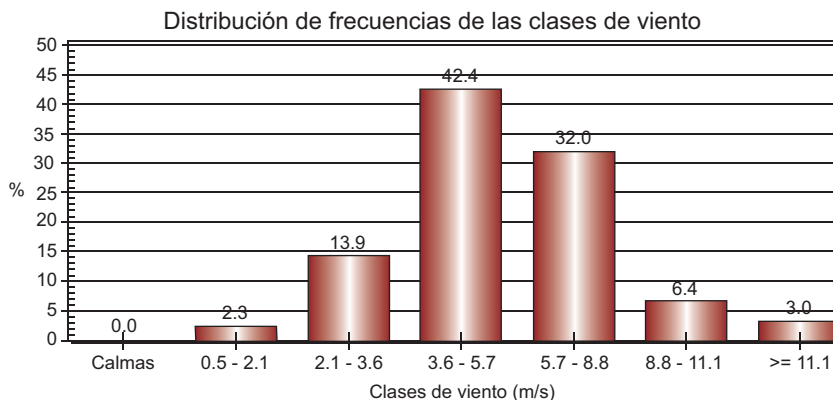
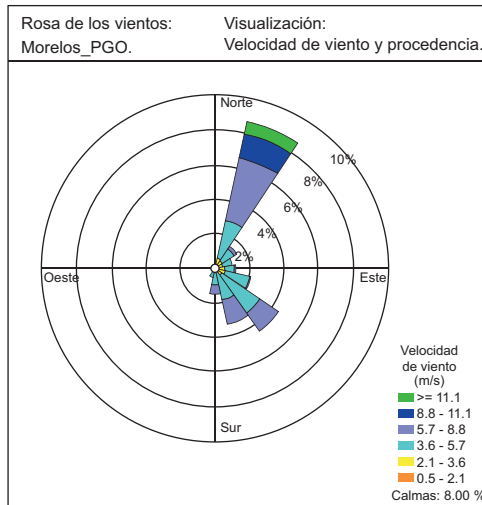


Fig. 16. Rosa de viento de la estación Cuernavaca 01 en el estado de Morelos (2019). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

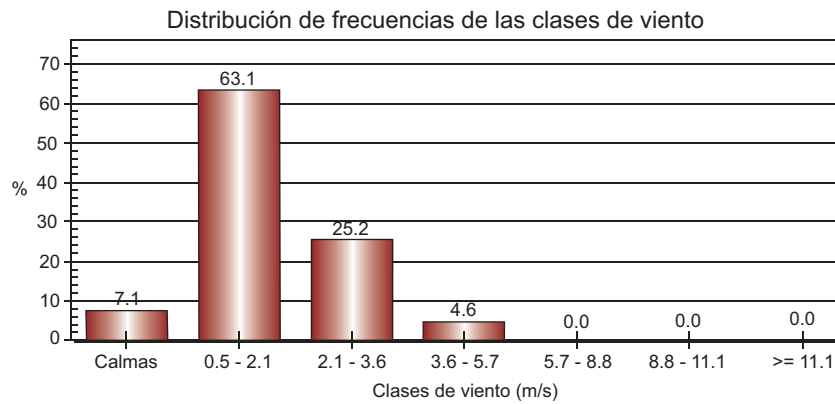
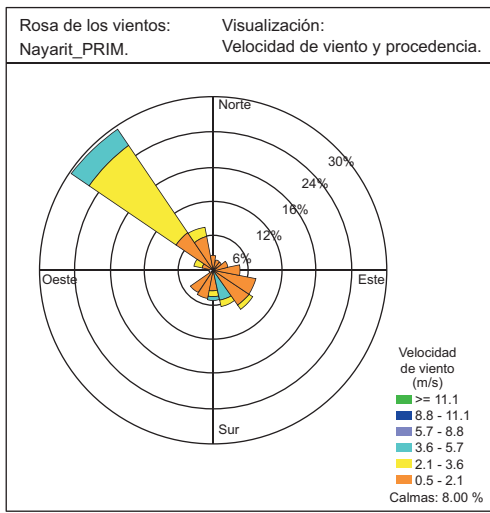


Fig. 17. Rosa de viento de la estación Primaria Julián Gascón Mercado en el estado de Nayarit (2017). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

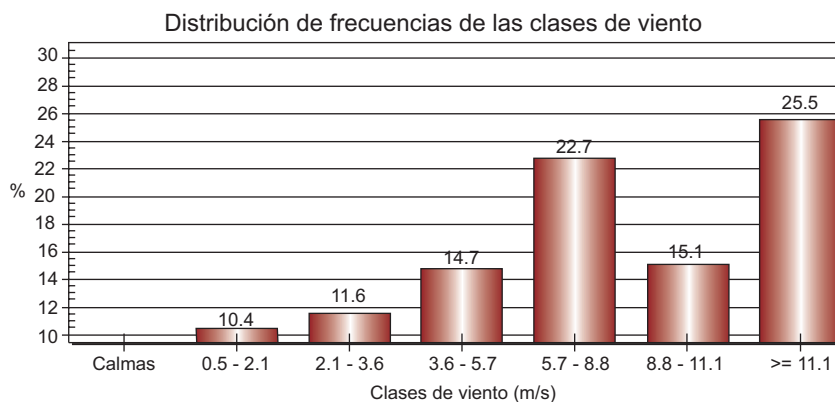
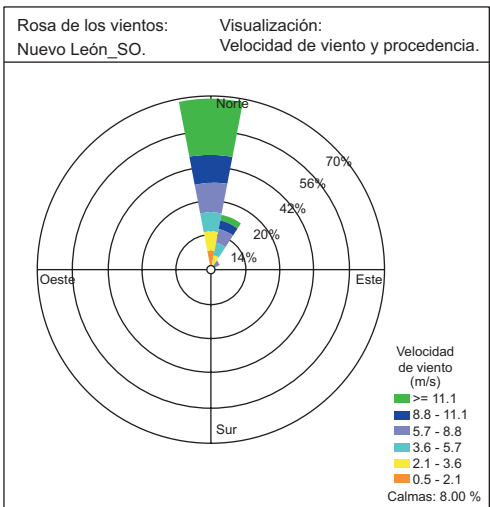


Fig. 18. Rosa de viento de la estación Santa Catarina en el estado de Nuevo León (2019). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

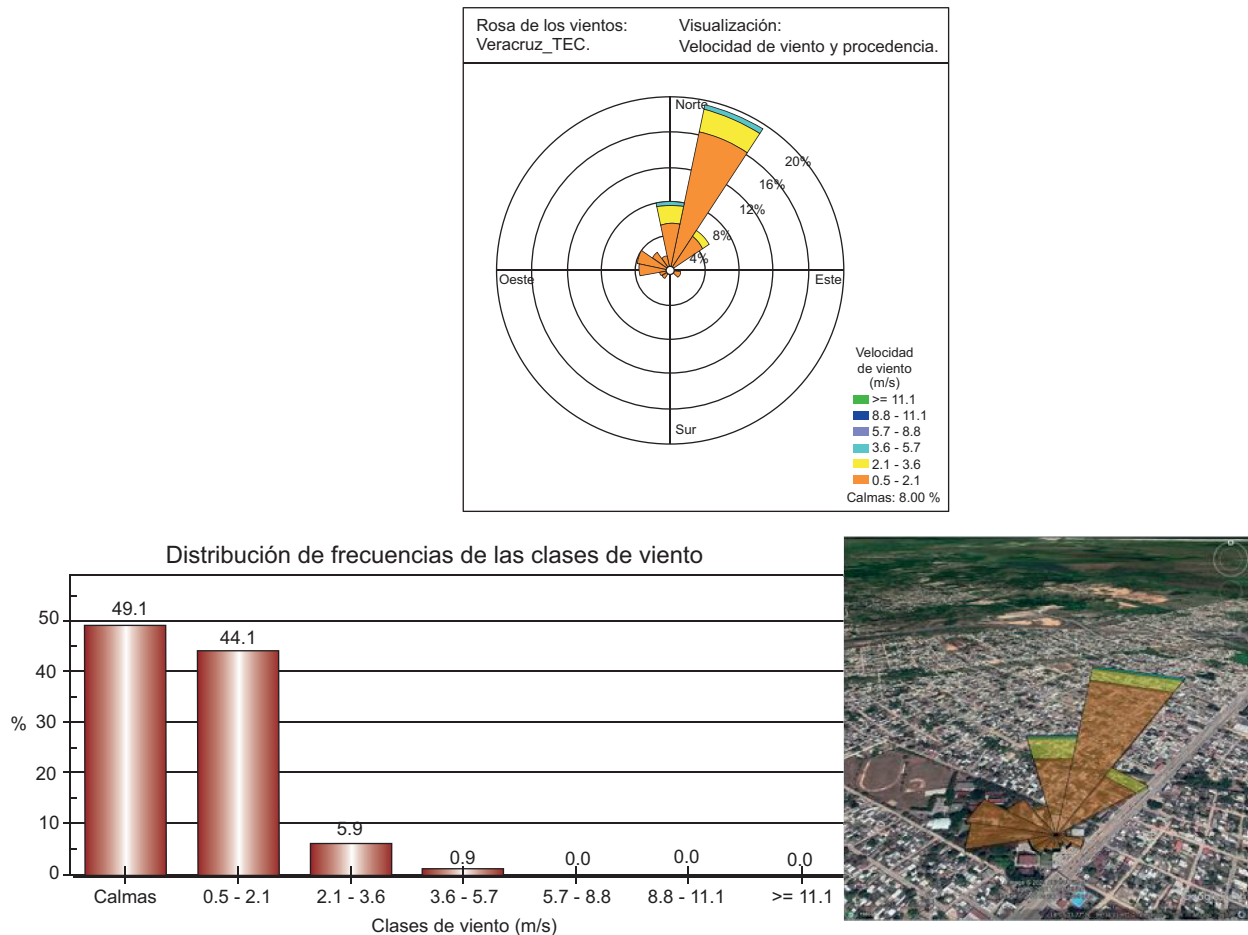


Fig. 19. Rosa de viento de la estación Tecnológico en el estado de Veracruz (2016). Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth Pro (GE 2021) y Lakes Software (LS 2018).

calcular el índice de riesgo por inhalación, tomando como dosis de referencia el límite máximo permisible anual de dichas partículas ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Díaz y Domínguez 2008). Mediante la evaluación del índice de riesgo se puede observar que en la estación de monitoreo Sur del estado de Chihuahua el valor más alto se registró en 2018, lo cual puede atribuirse a su ubicación en un área urbana principalmente habitacional y de tráfico vehicular fluido (**Fig. 20**).

En cuanto a las estaciones de monitoreo en la Ciudad de México, en la estación Xalostoc se obtuvieron registros con un índice de riesgo más alto en comparación con las demás estaciones durante el periodo 2016-2018. En 2019 se encontró un índice más alto en la estación Nezahualcóyotl, ya que si bien ambas estaciones se ubican en una zona urbana industrial, entre avenidas con tránsito intenso, en la estación Nezahualcóyotl predominan zonas residenciales y tráfico vehicular (**Fig. 21**).

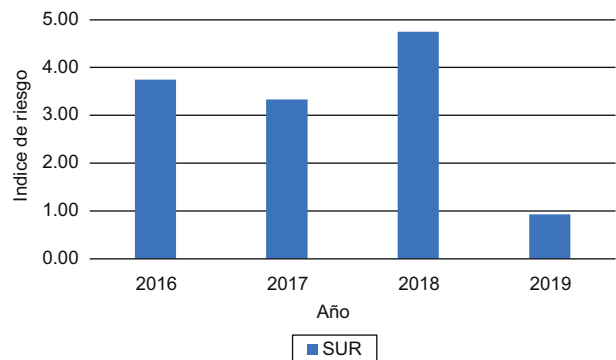


Fig. 20. Índice de riesgo a la salud por inhalación de PM_{2.5} en la estación Sur (SUR) del estado de Chihuahua, 2016-2019.

En la estación DIF de Coahuila no se registró índice de riesgo durante todo el periodo de estudio. En cambio, en el resto de las estaciones de monito-

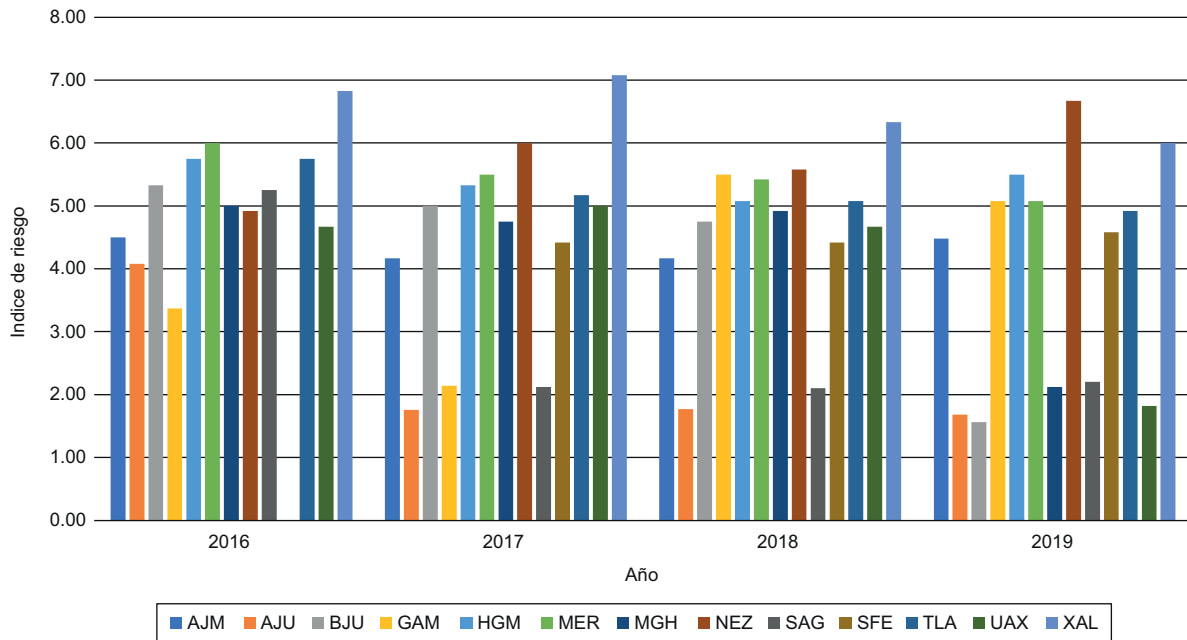


Fig. 21. Índice de riesgo a la salud por inhalación de $PM_{2.5}$ en la Ciudad de México, 2016-2019. Estaciones: Ajusco Medio (AJM), Ajusco (AJU), Benito Juárez (BJU), Gustavo A. Madero (GAM), Hospital General de México (HGM), Merced (MER), Miguel Hidalgo (MGH), Nezahualcóyotl (NEZ), San Agustín (SAG), Santa Fe (SFE), Tlalnepantla (TLA), Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco (UAX), Xalostoc (XAL).

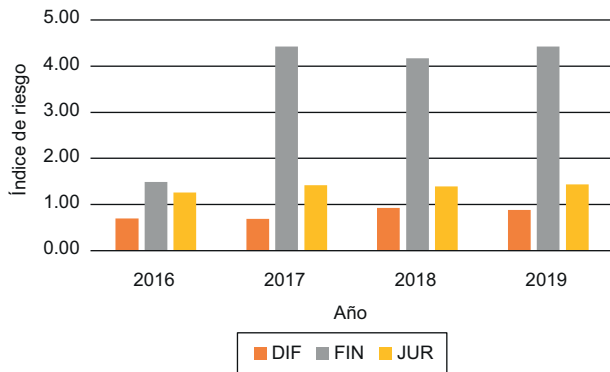


Fig. 22. Índice de riesgo a la salud por inhalación de $PM_{2.5}$ en el estado de Coahuila, 2016-2019. Estaciones: Centro de Rehabilitación DIF (DIF), Finanzas (FIN), Jurisdicción Sanitaria (JUR).

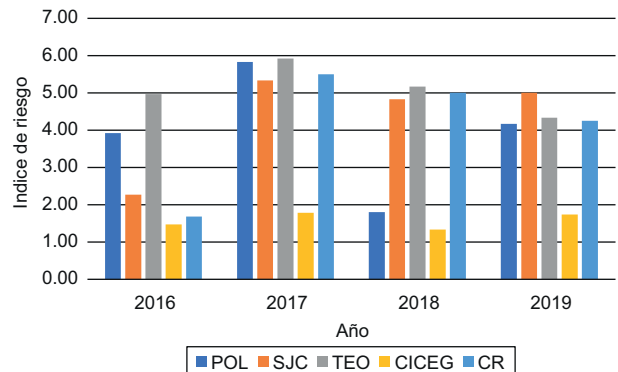


Fig. 23. Índice de riesgo a la salud por inhalación de $PM_{2.5}$ en el estado de Guanajuato, 2016-2019. Estaciones: Policía (POL), San Juanico (SJC), Teódula (TEO), Cámara de la Industria del Calzado del Estado de Guanajuato-Bomberos (CICEG), Cruz Roja (CR).

reo se presentaron índices de riesgo altos, siendo la estación Finanzas la que mostró los índices más altos en todos los años. Esto se debe a que se encuentra en una zona urbana principalmente comercial y de tráfico fluido (Fig. 22).

En las estaciones de monitoreo de Guanajuato se presentaron registros de índices de riesgo elevados durante todo el periodo 2016-2019, siendo 2017 el

año de registros más altos en todas las estaciones. Esto se debe a que las estaciones están ubicadas en una zona urbana residencial con algunos parques industriales, comerciales y de servicios, además de su cercanía con calles transitadas (Fig. 23).

Las estaciones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, en el Estado de México, registraron concentraciones con altos índices de riesgo a la salud

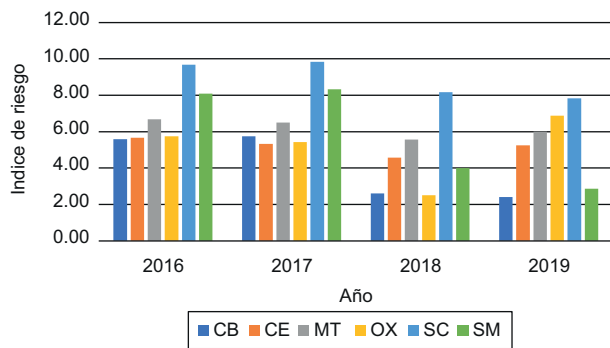


Fig. 24. Índice de riesgo a la salud por inhalación de PM_{2.5} en el Estado de México, 2016-2019. Estaciones: Ceberuoco (CB), Toluca Centro (CE), Metepec (MT), Oxtotitlán (OX), San Cristóbal (SC), San Mateo Atenco (SM).

por inhalación en todos los años. Destaca la estación San Cristóbal en 2017, debido a que se encuentra en una zona semiurbana habitacional, comercial, con calles pavimentadas, terrenos sin construcción y áreas carentes de cubierta vegetal (**Fig. 24**).

En la estación Cuernavaca 01, ubicada en el estado de Morelos, las concentraciones registradas

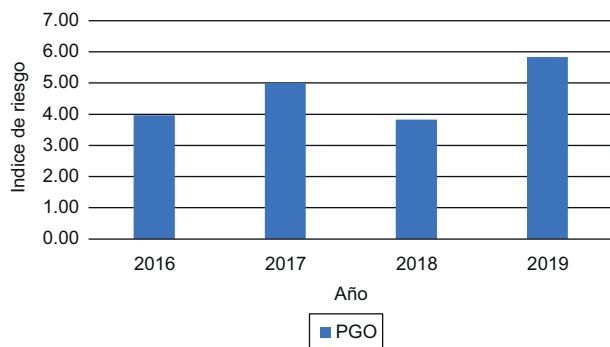


Fig. 25. Índice de riesgo a la salud por inhalación de PM_{2.5} en la estación Cuernavaca 01 (PGO) del estado de Morelos, 2016-2019.

determinaron un índice de riesgo elevado en todos los años, destacando 2019, probablemente porque se ubica en una zona urbana con muchos edificios, comercios, industrias y calles transitadas con flujo vehicular alto (**Fig. 25**).

Las estaciones de monitoreo en el estado de Nayarit presentaron concentraciones que determinaron un índice de riesgo elevado durante todos los años, destacando la estación Primaria Julián Gascón Mercado en 2017, debido a que se encuentra en una zona residencial, comercial y con flujo vehicular alto (**Fig. 26**).

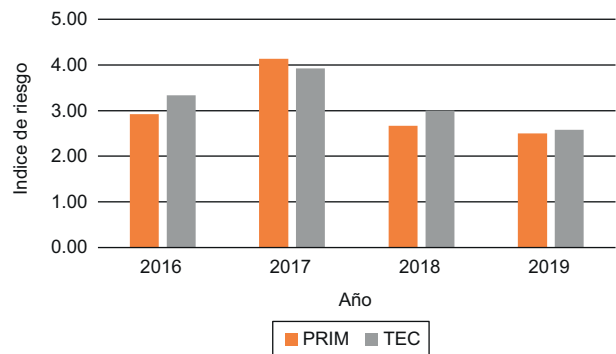


Fig. 26. Índice de riesgo a la salud por inhalación de PM_{2.5} en el estado de Nayarit, 2016-2019. Estaciones: Primaria Julián Gascón Mercado (PRIM), Tecnológico de Tepic (TEC).

En el estado de Nuevo León las estaciones de monitoreo presentaron concentraciones que determinaron un índice riesgo elevado en todos los años, destacando la estación Santa Catarina en 2019, debido a que se encuentra en una zona escolar, residencial y de calles transitadas, con la consecuente exposición a estas partículas (**Fig. 27**).

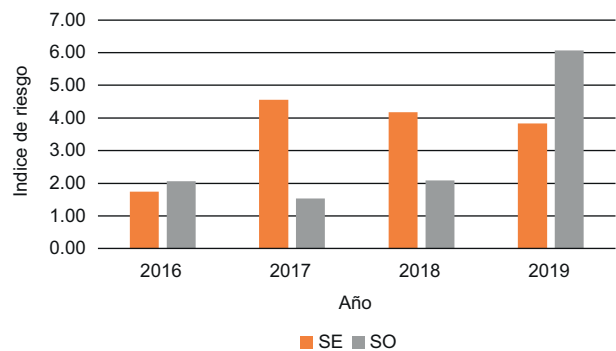


Fig. 27. Índice de riesgo a la salud por inhalación de PM_{2.5} en el estado de Nuevo León, 2016-2019. Estaciones: La pastora (SE), Santa Catarina (SO).

En las estaciones de monitoreo del estado de Veracruz se registraron concentraciones altas en todas las estaciones durante 2019, en comparación con los años anteriores. Cabe destacar que a pesar de que las tres estaciones se encuentran en diferentes municipios del estado, presentaron comportamientos similares (**Fig. 28**). La estación Tecnológico fue la de más alto índice de riesgo en todo el periodo de estudio y la estación Universidad Veracruzana la de menor índice.

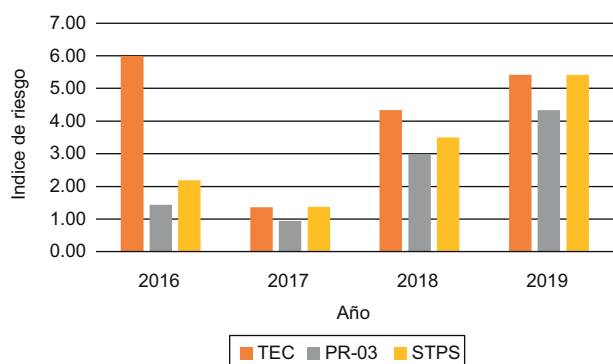


Fig. 28. Índice de riesgo a la salud por inhalación de $PM_{2.5}$ en el estado de Veracruz, 2016-2019. Estaciones: Tecnológico (TEC), Universidad Veracruzana (PR-03), Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS).

CONCLUSIONES

A partir de los valores promedio, máximo y mínimo que se presentan en el análisis de gráficos de tendencia de las $PM_{2.5}$, se puede concluir que el estado más contaminado en el periodo 2016-2019 fue el Estado México en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y dentro de ésta los registros más altos de contaminación se observaron en la estación San Cristóbal. Los estados menos contaminados fueron Chihuahua, Morelos y Nayarit. El año más contaminado en el periodo de estudio fue 2017 en el 55% de los estados.

Mediante el análisis del índice de riesgo a la salud por inhalación de $PM_{2.5}$ se estableció que los niveles más altos de riesgo se presentaron en la estación San Cristóbal del Estado de México en 2017 y la estación Xalostoc de la Ciudad de México (2016-2019). Los estados de Morelos, Nuevo León y Veracruz presentaron un incremento en el índice de riesgo durante el periodo de estudio, mientras que en la Ciudad de México dicho índice se mantuvo constante durante los cuatro años y en el Estado de México decreció en los dos últimos años.

En todos los sitios de estudio la concentración gravimétrica supera los valores máximos diarios y anuales establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 (SSA 2014).

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio observamos que en todos los sitios se presenta un índice de riesgo a la salud por inhalación de $PM_{2.5}$. Este resultado se registra sólo para la concentración gravimétrica y no se toman en cuenta los índices de riesgos ocasionados por la composición química elemental, las bacterias, hongos e hidrocarburos

aromáticos policíclicos, entre otros que pueden estar presentes en las $PM_{2.5}$. Si se consideraran estos factores, el índice de riesgo a la salud por inhalación de $PM_{2.5}$ se incrementaría.

El índice de riesgo presente en el área de estudio es un indicio de la probabilidad de contraer enfermedades relacionadas con la inhalación de $PM_{2.5}$, como asma, enfermedades del sistema nervioso central y cardiovasculares, entre otras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las siguientes organizaciones e individuos: a la SEP-CONACYT por el financiamiento para la ejecución del proyecto CB:2015-01-25675; al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por el apoyo de esta investigación; al Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) por la información proporcionada sobre la concentración gravimétrica medida en las redes de monitoreo de los distintos sitios de la República Mexicana.

REFERENCIAS

- ATSDR (2019a). Curso de toxicología para comunidades. Módulo III - Introducción a la evaluación de riesgo: notas para la instrucción. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [en línea]. https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/3/es_lecturenotes.html 18/08/2021
- ATSDR (2019b). Curso de toxicología para comunidades. Módulo III - Introducción a la evaluación de riesgo: notas y material visual. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [en línea]. https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/3/es_datagathering.html 18/08/2021
- Barzeghar V., Sarbakhsh P., Hassanvand M.S., Faridi S. y Gholampour A. (2019). Long-term trend of ambient air PM_{10} , $PM_{2.5}$, and O_3 and their health effects in Tabriz city, Iran, during 2006-2017. *Sustainable Cities and Society* 54, 101988. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101988>
- Bu Q., Hong Y., Tan H., Liu L., Wang C., Zhu J., Chan P. y Chen C. (2021). The modulation of meteorological parameters on surface $PM_{2.5}$ and O_3 concentrations in Guangzhou, China. *Aerosol Air Quality Research* 21 (1), 200084. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.03.0084>
- COFEPRIS (2017). Clasificación de los contaminantes del aire ambiente. Comisión Federal para la Protección

- Contra Riesgos Sanitarios [en línea]. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente> 12/09/21
- Díaz R.V. y Domínguez E. (2008). Health risk by inhalation of PM_{2.5} in the metropolitan zone of the City of Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72 (3), 866-871. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.09.014>
- Figueroa A., Davydova-Belitskaya V., Garibay G., Parada T. y Orozco-Medina M.G. (2016). PM₁₀ y O₃ como factores de riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y neumonía en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Ingeniería* 20 (1), 14-23. ISSN: 1665-529X. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927002.pdf>
- GE (2021). Google Earth Pro, v. 7.3 [en línea]. https://www.google.com/intl/es_ALL/earth/versions/download-thank-you/?usagelists=1 03/10/2021
- Hadei M., Hopke P.K., Hashemi Nazari S.S., Yarahmadi M., Shahsavani A. y Alipour M.R. (2017). Estimation of mortality and admissions attributed to criteria pollutants in Tehran Metropolis, Iran (2013-2016). *Aerosol Air Quality Research* 17 (10), 2474-2481. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.04.0128>
- INECC (2020). Informe nacional de la calidad del aire 2020. Informe. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Ciudad de México, México, 488 pp.
- INEGI (2021). Marco geoestadístico nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]. https://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/div_territorial/nacionalestados_sn.pdf 25/05/23
- INEGI (2022). Climatología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas> 20/01/22
- Kermani M., Jafari A.J., Gholami M., Fanaei F. y Arfaei-nia H. (2020). Association between meteorological parameter and PM_{2.5} concentration in Karaj, Iran. *International Journal of Environmental Health Engineering* 9 (1), 4.
- Kliengchuay W., Cooper M.A., Worakhunpiset S. y Tantrakarnapa K. (2018). Relationships between meteorological parameters and particulate matter in Mae Hong Son Province, Thailand. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (12), 2801. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122801>
- Liu Y., Zhou Y. y Lu J. (2020). Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance. *Scientific Reports Nature Research* 10, 14518. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71338-7>
- LS (2018). WRPLOT view. Wind rose plots for meteorological data, v. 8.0.2. Lakes Software [en línea]. <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/> 08/06/2021
- OMS (2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. Organización Mundial de la Salud [en línea]. <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action> 10/09/2021
- SINAICA (2021). Índice aire y salud. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, México [en línea]. <https://sinaica.inecc.gob.mx> 12/09/2021
- SSA (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México, 20 de agosto.
- USEPA (2016). Evaluación de riesgo para contaminantes tóxicos del aire: guía de un ciudadano. United States environmental Protection Agency [en línea]. https://www3.epa.gov/airtoxics/3_90_024sp.html 20/09/2021
- WS (2021). Clima y tiempo promedio durante todo el año en México. Cedar Lake Ventures [en línea]. <https://es.weatherspark.com/countries/MX> 15/06/2021
- Zhou W., Chen C., Lei L., Fu P. y Sun Y. (2021). Temporal variations and spatial distributions of gaseous and particulate air pollutants and their health risks during 2015-2019 in China. *Environmental Pollution* 272, 116031. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116031>