



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

“Análisis de patrones temporales de partículas
suspendidas menores a 10 micrómetros en la
ciudad de Morelia, Michoacán durante el
periodo de 2016-2021”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

SOFIA MARIBEL RUIZ LUNA

DIRECTOR DE TESIS: DR. CARLOS ANTONIO ANAYA MERCHANT

MORELIA, MICHOACÁN

NOVIEMBRE, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

“Análisis de patrones temporales de partículas
suspendidas menores a 10 micrómetros en la
ciudad de Morelia, Michoacán durante el
periodo de 2016-2021”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

SOFIA MARIBEL RUIZ LUNA

DIRECTOR DE TESIS: DR. CARLOS ANTONIO ANAYA MERCHANT

MORELIA, MICHOACÁN

NOVIEMBRE, 2023



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 05** del **Comité Académico de la Licenciatura en Ciencias Ambientales** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **19 de junio de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Sofía Maribel Ruiz Luna** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **417090227**, con el trabajo titulado: **"Análisis de patrones temporales de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros en la ciudad de Morelia, Michoacán durante el periodo de 2016-2021"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Carlos Antonio Anaya Merchant**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dra. Alejandra Castro Carranza
Vocal:	M. en C. Neftalí Razo Pérez
Secretario:	Dr. Carlos Antonio Anaya Merchant
Suplente:	M. en C. Benjamín Villalobos Castañeda
Suplente:	Dr. Luis Bernardo López Sosa

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 15 de noviembre de 2023.

DRA. YUNUEN TARIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

Agradecimientos

Reconocimiento a la Licenciatura en Ciencias Ambientales y a los apoyos recibidos por la Beca de Titulación de Egresados Alto Rendimiento 2022 de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, UNAM.

A la Red Universitaria de Observación Atmosférica (RUOA) a través del Observatorio Atmosférico Morelia (OAM), por proporcionarnos los datos necesarios de calidad del aire, con los que fue posible la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Carlos Antonio Anaya Merchant, mi asesor de tesis, por brindarme su apoyo y tiempo en cada momento, así como en orientarme para la realización de este trabajo, por compartirme sus conocimientos y experiencias, así como en tenerme paciencia durante estos años de colaboración.

Al jurado de revisión conformado por:

Presidente	Dra. Alejandra Castro Carranza.
Vocal	M. C. Neftalí Razo Pérez.
Suplente	M. C. Benjamín Villalobos Castañeda.
Suplente	Dr. Luis Bernardo López Sosa.

Esto por sus consejos, tiempo y retroalimentación a este estudio, así como su amplia disposición a apoyarme y escucharme.

Dedicatorias

Dedico este trabajo a la persona más importante de mi vida, mi madre, Verónica Luna Arias, que siempre ha buscado impulsarme para alcanzar cada uno de mis sueños, estando para mí en cada momento. Gracias por ser aquel lugar seguro durante este largo camino, y hacer que las cosas sean un poco más fáciles. Sin ella, este trabajo no hubiera podido ser culminado. Gracias por ser mi madre.

Agradezco a mi querida abuelita, Ma. Del Carmen Arias Guzmán, que ha sido uno de los motores más grandes en mi vida, ella, así como mi madre, son mi corazón, aquello que me ha permitido mejorar como persona y profesionalista, siempre mirando hacia adelante con los pies sobre la tierra.

Agradezco a todos mis amigos, Federico Hernández Valencia, Verónica Torres, Isaac Aldair Galindo Comonfort, Susana Bautista, Elisa Belmonte, Luis Fernando Espinoza Sánchez, Ana Claudia Nepote, Alejandra Carranza, Karen López Rivera, mi querida tía Socorro Luna Arias, que siempre buscaba mi bienestar y a aquellos que pueda olvidar que siempre me apoyaron de una forma u otra en terminar este escalón, siempre brindándome la fortaleza que yo requería en su momento.

“Seré fiel a quién soy, buscando en la oscuridad aquello que nace de mi espíritu y me permita iluminar mi camino” S.L.

Resumen

La contaminación atmosférica es un problema a nivel nacional e internacional, que ocasiona efectos nocivos sobre la salud de los humanos, las plantas, los animales y los ecosistemas. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la exposición a altas concentraciones de contaminantes atmosféricos es uno de los principales riesgos ambientales relacionados directamente con problemas de salud pública, generando la mortalidad prematura de alrededor de 7 millones de personas al año.

Uno de los contaminantes atmosféricos más relevantes en tema de efectos en la salud lo constituyen las partículas suspendidas menores a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) y menores a $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), que ocasionan efectos adversos en vías respiratorias superiores e inferiores. Bajo este contexto, se desarrolló un análisis de los patrones temporales de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros en la ciudad de Morelia, Michoacán durante un periodo de seis años, comprendido entre el 2016 al 2021, esto con la finalidad de evaluar los niveles de contaminación de PM_{10} , analizar sus patrones de variación a diferentes escalas de tiempo e identificar los factores que influyen en dichos niveles.

Para este análisis se utilizaron datos de concentración de PM_{10} generados por el Observatorio Atmosférico Morelia, ubicado en la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. Así como datos de parámetros meteorológicos generados por el mismo Observatorio, para evaluar sus efectos sobre los patrones temporales de PM_{10} . Además de esto, se compararon los valores de concentración de PM_{10} con valores normalizados para el mismo contaminante y se realizaron análisis estadísticos para establecer el efecto de los parámetros atmosféricos sobre los patrones de dicho contaminante a diferentes escalas de tiempo.

A partir de este análisis se observó que las concentraciones de PM_{10} no presentaron un cambio significativo en los promedios de concentración anual, registrando una media de $23\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante los seis años de estudio. Este valor está por debajo del límite establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA-2021, que es de $36\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ pero arriba de la norma internacional de la OMS, 2021 que es de $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso de la variación mensual, se encontró que las concentraciones más altas se registraron durante los meses secos de abril a mayo, mientras que las más bajas se presentaron en los meses lluviosos de junio a agosto.

Los promedios mensuales de PM_{10} tuvieron una correlación positiva con la temperatura atmosférica y la velocidad del viento, y una correlación negativa con la humedad atmosférica. No obstante, un análisis de regresión múltiple muestra que la humedad relativa explica alrededor del 70% de la variación en las PM_{10} y que las otras dos variables atmosféricas no contribuyen de manera significativa a explicar un mayor porcentaje de la variación en el material particulado. Las concentraciones diarias de PM_{10} tuvieron una variación muy amplia, y no mostraron variación evidente entre días de la semana. Estas concentraciones estuvieron por debajo de la NOM-025-SSA-2021, con excepción de algunos valores atípicos

presentados durante el periodo, no obstante, alrededor del 20% de los días presentaron valores por encima del valor de las directrices de la OMS, 2021. A escala horaria, las concentraciones de PM_{10} mostraron un patrón marcado a lo largo del día en diferentes temporadas del año, concentrándose los mayores registros entre 9 y 11 de la mañana.

Los resultados de esta investigación muestran que la calidad del aire en Morelia, con respecto a la concentración de PM_{10} , es de regular a mala. La concentración de PM_{10} tiende a aumentar durante los meses más cálidos y secos del año (abril y mayo), lo cual puede estar asociado con factores meteorológicos (descenso de la humedad y aumento de la temperatura) y con el incremento de incendios forestales. La concentración de PM_{10} varía a lo largo del día, siendo generalmente mayor por la mañana, posiblemente asociado a una baja dispersión de los contaminantes debido a la ocurrencia de inversiones térmicas matutinas.

La importancia del monitoreo de PM_{10} , así como el análisis de sus concentraciones a diferentes escalas temporales, permite no solo evaluar el riesgo que presenta este contaminante para la salud humana en un área determinada, sino también en poder entender su comportamiento de la contaminación durante temporadas y fenómenos meteorológicos. Complementar estos análisis con estudios sobre las fuentes de emisión de dicho contaminante, permitirá poder proponer medidas para mitigar los niveles de contaminación atmosférica, y disminuir el riesgo que presenta éste para la salud de la población y de los ecosistemas.

Palabras clave: contaminación atmosférica, partículas suspendidas, PM_{10} , patrones temporales, variables meteorológicas

Summary

Air pollution is a national and international problem that causes harmful effects on the health of humans, plants, animals, and ecosystems. According to the World Health Organization, exposure to high concentrations of air pollutants is one of the main environmental risks directly related to public health problems, causing the premature mortality of about 7 million people per year.

One of the most relevant air pollutants in terms of health effects are suspended particles smaller than 10 μm (PM_{10}) and smaller than 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$), which cause adverse effects on upper and lower respiratory tract. Under this context, an analysis of the temporal patterns of suspended particles smaller than 10 micrometers in the city of Morelia, Michoacán was developed for a period of six years, from 2016 to 2021, to evaluate the levels of PM_{10} pollution, analyze their variation patterns at different time scales and identify the factors that influence these levels.

For this analysis, PM_{10} concentration data generated by the Morelia Atmospheric Observatory, located at the “Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia”, were used. As well as meteorological parameter data generated by the same Observatory, to evaluate their effects on the temporal patterns of PM_{10} . In addition, PM_{10} concentration values were compared with normalized values for the same pollutant and statistical analyses were performed to establish the effect of the atmospheric parameters on the patterns of this pollutant at different time scales.

From this analysis, it was observed that PM_{10} concentrations didn't present a significant change in the annual concentration averages, registering an average of 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ during the six years of study. This value is below the limit established by the Mexican Official Standard “NOM-025-SSA-2021”, which is 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ but above the WHO international standard, 2021 which is 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In the case of monthly variation, it was found that the highest concentrations were recorded during the dry months from April to May, while the lowest concentrations occurred in the rainy months from June to August.

Monthly PM_{10} averages were positively correlated with atmospheric temperature and wind speed, and negatively correlated with atmospheric humidity. However, a multiple regression analysis shows that relative humidity explains about 70% of the variation in PM_{10} and that the other two atmospheric variables don't contribute significantly to explaining a larger percentage of the variation in particulate matter.

Daily PM_{10} concentrations had a very wide variation and showed no obvious variation between days of the week. These concentrations were below the NOM-025-SSA-2021, except for some outliers presented during the period, however, about 20% of the days presented values above the value of the WHO guidelines, 2021. On an hourly scale, PM_{10} concentrations showed a marked pattern throughout the day in different seasons of the year, concentrating the highest records between 9 and 11 am.

The results of this research show that air quality in Morelia, with respect to PM₁₀ concentration, is fair to poor. PM₁₀ concentration tends to increase during the hottest and driest months of the year (April and May), which may be associated with meteorological factors (decrease in humidity and increase in temperature) and with the increase in forest fires. PM₁₀ concentration varies throughout the day, being generally higher in the morning, possibly associated with a low dispersion of pollutants due to the occurrence of morning thermal inversions.

The importance of PM₁₀ monitoring, as well as the analysis of its concentrations at different time scales, allows not only to evaluate the risk that this pollutant presents to human health in each area, but also to understand its pollution behavior during seasons and meteorological phenomena. Complementing these analyses with studies on the sources of emissions of this pollutant will allow us to propose measures to mitigate the levels of atmospheric pollution and reduce the risk it presents to the health of the population and ecosystems.

Key words: air pollution, suspended particulate matter, PM₁₀, temporal patterns, meteorological variables.

Índice

1. Introducción	13
2. Marco teórico	15
3. Planteamiento del problema	18
4. Antecedentes	20
5. Preguntas de investigación	22
6. Predicciones	22
7. Objetivos	23
8. Metodología	24
8.1 Descripción de la zona de estudio	24
8.2. Orografía	24
8.3. Clima	25
8.4. Parque Vehicular	28
8.5. Población	28
8.6. Zonas industriales	28
8.7. Caracterización del observatorio atmosférico	29
8.8. Métodos instrumentales de monitoreo de PM ₁₀	30
8.9. Métodos instrumentales de monitoreo de variables meteorológicas	31
8.10. Validación y análisis de datos	31
8.11 Procedimientos estadísticos	31
9. Resultados	33
9.1 Variación anual	33
9.2 Variación mensual	33
9.3 Variación diaria	35
9.4 Variación horaria	36
10. Discusión	38
10.1 Variación anual	38
10.2 Variación mensual	40
10.3 Variación diaria	43
10.4 Variación horaria	44
11. Conclusiones	46
12. Bibliografía	48

Lista de figuras

Figura 1. Efectos del material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en el sistema respiratorio. Fuente: Gianre L. 2021	13
Figura 2. Principales características de las partículas en suspensión (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Fuente: Perez-Cejuela, s.f.	16
Figura 3. Mapa de localización del municipio de Morelia en el Estado de Michoacán. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI, 2022.....	24
Figuras 4 A) y B). Mapas de los promedios diarios de temperatura y humedad relativa del OAM durante el periodo de 2016–2021 en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos del OAM.....	26
Figura 5. Precipitación mensual \pm error estándar del OAM, para el periodo de 2016-2021 en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	27
Figura 6. Rosas de viento del OAM, para el periodo de 2016-2021 en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos horarios provenientes del OAM.....	27
Figura 7. Observatorio Atmosférico Morelia (OAM), ubicado en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Michoacán, UNAM. Fuente: http://www.ruoa.unam.mx/	29
Figura 8. Partes del monitor continuo de partículas ambientales FH62C14. Fuente: Thermo Fisher Scientific, 2007.....	30
Figura 9. Promedios mensuales de $PM_{10} \pm$ error estándar, durante el periodo de 2016-2021 en el OAM, ubicado en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	34
Figura 10. Análisis de regresión lineal entre los registros mensuales de PM_{10} y humedad relativa, durante el periodo de 2016-2021 en el OAM, ubicado en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	34
Figura 11. Distribución de frecuencias relativas (%) de PM_{10} durante el periodo de 2016–2021 en Morelia, Michoacán. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	35
Figura 12. Gráfico de caja y bigote de las concentraciones promedio diarias de PM_{10} , para el periodo de 2016 a 2021 en Morelia, Michoacán, y su comparativa con los límites permisibles por la norma nacional “NOM-025-SSA1-2021” (línea verde) y las directrices de la OMS, 2021 (línea roja). Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	35
Figura 13. Concentraciones promedio diarias de $PM_{10} \pm$ error estándar, a partir de los días de la semana para cada temporada del año durante el periodo de 2016 a 2021, para la estación OAM, del municipio de Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	36
Figura 14. Series de tiempo de las concentraciones horarias de $PM_{10} \pm$ un error estándar, para cada temporada del año durante el periodo de 2016 a 2021, para la estación OAM, del municipio de Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	37
Figura 15. Odómetro vectorial de contaminación para el promedio anual de PM_{10} de la estación OAM durante el periodo de 2016 a 2021, en comparación con el límite nacional (color amarillo) y el límite internacional de las OMS (color verde), para el municipio de Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos de la OAM.....	38
Figura 16. Análisis de regresión lineal entre los registros diarios de PM_{10} y $PM_{2.5}$, durante el periodo de 2016-2021 en el OAM, ubicado en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	40

Figura 17. Promedio mensual de la concentración horaria del monitoreo continuo de PM₁₀ en la Zona Metropolitana del Valle de México. Fuente: SEDEMA, 2023..... **42**

Figura 18. Promedio mensual de la concentración horaria del monitoreo continuo de PM₁₀ en la ciudad de León, Guanajuato, para el año 2021. Fuente: SEICA, 2021..... **42**

Figura 19. Imagen satelital de los incendios forestales y/o agrícolas registrados durante el día 04 de abril de 2016 en el municipio de Morelia, Michoacán. Nota: los cuadros de color rojo representan los incendios registrados durante el día de consulta; la ubicación de la estación de monitoreo OAM se visualiza con un icono de localización. Fuente: NASA, 2016..... **44**

Lista de tablas

Tabla 1. Valores promedio \pm error estándar de las principales variables meteorológicas reportadas para el Observatorio Atmosférico Morelia en el periodo de 2016 – 2021, en Morelia, Michoacán. Fuente: Elaboración a partir de datos del OAM.....	25
Tabla 2. Instalaciones industriales en el municipio de Morelia, Michoacán. Fuente: elaboración a partir del IMPLAN Morelia, 2019.....	28
Tabla 3. Características básicas del Observatorio Atmosférico Morelia (OAM), ubicado en la ENES, Morelia, Michoacán. Fuente: Elaboración a partir de datos obtenidos del INECC, 2019.....	29
Tabla 4. Estadísticas básicas de PM ₁₀ \pm error estándar, de la estación de monitoreo OAM, Morelia, Michoacán. Los valores en rojo indican insuficiencia de datos (<75% de datos válidos para la elaboración de un análisis). Fuente: Elaboración a partir de datos del OAM.....	33
Tabla 5. Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio, Morelia Michoacán. Fuente: SEMARNAT, 2019.....	39
Tabla 6. Promedios mensuales de PM ₁₀ de Morelia (OAM), Naucalpan de Juárez y León, Guanajuato. Fuente: OAM, s.f.; SEDEMA, 2023; SEICA, 2021.....	43
Tabla 7. Resumen de los promedios anuales, mensuales, diarios y horarios de PM ₁₀ durante el periodo de 2016-2021 en el OAM, ubicado en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.....	45

1. Introducción

La contaminación atmosférica es considerada un problema de vital importancia a nivel nacional e internacional, ya que esta incide negativamente en la salud de la población humana y de los seres vivos en general, por lo que su efecto puede verse reflejado en la disminución de la calidad de vida de las personas, en reducciones de la productividad agrícola y en impactos no deseados en la economía de las naciones (SEMARNAT, 2019; Romero *et al.*, 2004).

A nivel mundial, millones de personas sufren de enfermedades respiratorias asociadas a la contaminación del aire, tanto en ambientes interiores como exteriores. Estudios epidemiológicos demuestran que la exposición a diferentes contaminantes atmosféricos, incluso a niveles por debajo de las normas internacionales, se asocian con un incremento en la incidencia de asma, severidad en el deterioro de la función pulmonar, así como mayor gravedad en la presentación de las enfermedades respiratorias (**Figura 1**) (Romero *et al.*, 2004).

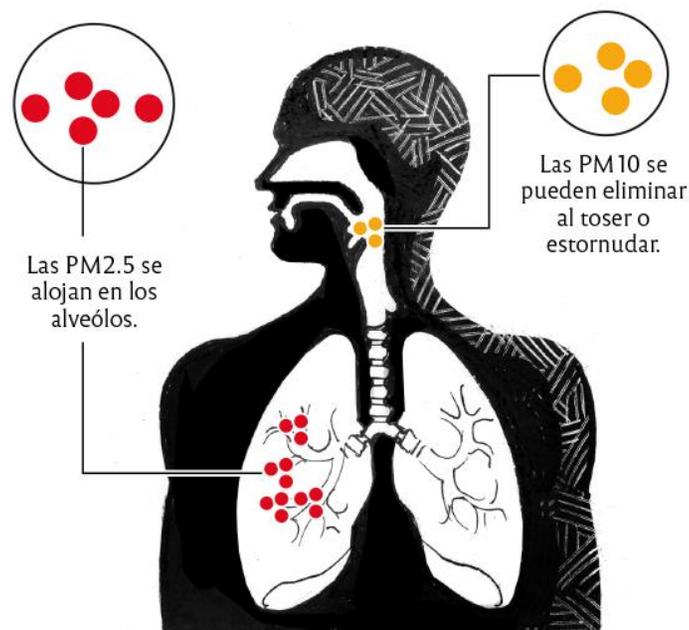


Figura 1. Efectos del material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en el sistema respiratorio. Fuente: Gianre L. 2021.

Los niveles de contaminación atmosférica suelen ser mayores en zonas urbanas que en zonas rurales como consecuencia de la combustión de biomasa y combustibles fósiles en los sectores industrial, de transporte y doméstico que predominan en las ciudades (Camilloni *et al.*, 2007). Además, muchos de los contaminantes primarios que son emitidos a la atmósfera urbana se comportan como catalizadores que propician ciertas reacciones químicas y fotoquímicas que dan lugar a contaminantes secundarios. Estas reacciones químicas que generan contaminantes secundarios suelen ser promovidas por el reemplazo de las

coberturas de vegetación por superficies construidas, la liberación de calor antropogénico a la atmósfera por la industria y los automóviles, el uso de sistemas de refrigeración y aire acondicionado y la generación de residuos urbanos. De esta forma, el aire de las zonas urbanas suele concentrar una mezcla de diferentes gases contaminantes, entre los que destacan: el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxidos de carbono, ozono, aerosoles y partículas suspendidas (Camilloni *et al.*, 2007).

Las partículas suspendidas se han considerado como uno de los principales contaminantes en las zonas urbanas de tamaño medio y grande, debido a que sus concentraciones atmosféricas en estas áreas a menudo alcanzan altos niveles, que llegan a superar los niveles permitidos por las normas (Camilloni *et al.*, 2007). Estas partículas están relacionadas con problemas de salud humana, ya que pueden llegar a penetrar hasta los alvéolos de los pulmones y provocar deterioro de la función pulmonar y enfermedades respiratorias como el asma. Así mismo, estas partículas pueden afectar negativamente las condiciones del ambiente, como promover el aumento de la temperatura atmosférica, generar lluvia ácida y reducir la visibilidad, entre otros (Romero *et al.*, 2006; Querol, 2008). No obstante, existe muy poca información sobre los niveles de contaminación por partículas suspendidas en las ciudades de México. Más aún, existen muy pocos estudios que analicen su variabilidad temporal y los factores que influyen sobre esta variabilidad, como las fuentes de emisión y los procesos de dispersión de contaminantes. Esta información es de suma importancia tanto para advertir a la población de los posibles riesgos a la salud humana por la contaminación atmosférica, como para tomar medidas apropiadas para mitigar la emisión de contaminantes atmosféricos y reducir sus concentraciones atmosféricas.

En este contexto, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar los niveles de contaminación atmosférica por partículas suspendidas en la ciudad de Morelia, Michoacán y analizar su variación temporal a diferentes escalas temporales entre el 2016 y el 2021. Para ello se usaron datos de concentración de partículas suspendidas menores a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}), y datos de parámetros meteorológicos (p. ej. dirección y velocidad del viento, temperatura, etc.) generados por el observatorio atmosférico de la ENES Unidad Morelia. Se determinaron los patrones de variación de las concentraciones atmosféricas de PM_{10} a escala anual, mensual, diaria y horaria, y se analizaron las relaciones de estos con los parámetros atmosféricos. Se discute la relevancia de los niveles de contaminación encontrados, los posibles factores meteorológicos que influyen sobre los patrones de contaminación, y se generaron hipótesis sobre las principales fuentes de contaminantes para dicha ciudad.

2. Marco Teórico

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) define a la contaminación atmosférica como la “aparición en el aire de una o varias sustancias extrañas en cantidades abundantes y durante periodos de tiempo prolongados, que producen efectos nocivos sobre el hombre, las plantas, los animales o los ecosistemas, así como la perturbación en el bienestar”. Hoy en día se encuentran identificadas unas 3,000 sustancias consideradas como contaminantes atmosféricos, entre las que se encuentran a las partículas suspendidas menores a 10 micrómetros o PM_{10} .

Las PM_{10} abarcan una gran variedad de sustancias sólidas y líquidas, que han sido emitidas directamente a la atmósfera o que se han generado a través de reacciones químicas de sustancias atmosféricas, y que de acuerdo con ello son llamadas contaminantes primarios o secundarios, respectivamente. Los principales componentes de estas partículas suelen ser metales (ej. plomo, hierro, vanadio), compuestos orgánicos, material de origen biológico (ej. virus, bacterias, restos de animales y plantas, tales como fragmentos de polen), iones (sulfatos, nitrato y ácidos) y gases reactivos (peróxidos y aldehídos), y su núcleo se forma frecuentemente de carbono elemental (EPA, 1999).

El tiempo de residencia de las partículas suspendidas en la atmósfera se encuentra estrechamente vinculado a su tamaño, siendo menor este tiempo en partículas de mayor diámetro; por ejemplo, el tiempo de residencia de las partículas de menos de 1 micra de diámetro puede llegar a los 10 días, mientras que el de las partículas de 10 micras puede ser de horas (Ayuntamiento de Valladolid, 2021). Asimismo, el tamaño de las partículas puede afectar su dispersión; en general, conforme disminuye el tamaño de las partículas, su dispersión ocurre a mayor distancia (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2017).

Debido a que las partículas son de tamaño, forma y composición variada, para su identificación en cuanto a tamaño y forma, se han clasificado en términos de diámetro aerodinámico, ya que es su tamaño el que determinará cómo se comportará en la atmósfera y qué tan profundamente penetran en el sistema respiratorio (**Figura 2**). Bajo este contexto, el tamaño de las partículas es la característica física más importante para determinar su nocividad: el que no ingresa al aparato respiratorio (no inhalables), quedando atrapado en nuestras fosas nasales al presentar un diámetro mayor a $10\ \mu m$, y el que sí ingresa al aparato respiratorio al presentar un diámetro menor a $10\ \mu m$ (Aldunate *et al.*, 2006).

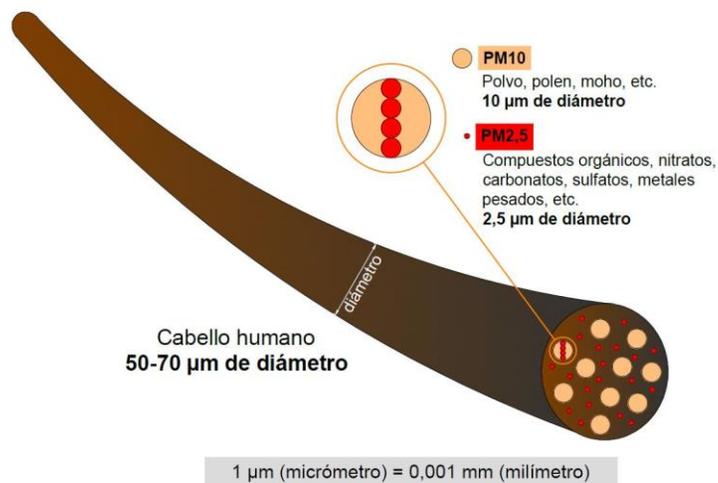


Figura 2. Principales características de las partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2.5}). Fuente: Perez-Cejuela, s.f.

Las fuentes de las partículas suspendidas se han clasificado en naturales y antropogénicas de acuerdo con los procesos que las originan (Aldunate *et al.*, 2006). Las primeras derivan de procesos tales como las erupciones volcánicas, la acción erosiva del viento y su transporte desde ecosistemas áridos o degradados, producción vegetal de polen, esporas y los incendios forestales. En cuanto a los procesos antrópicos, tenemos el desgaste del pavimento y de los neumáticos en el transporte rodado, actividades mineras, las quemadas agrícolas, la explotación de canteras, la producción de cemento, las centrales térmicas y las combustiones industriales, de transporte y residenciales, las obras de edificación y las obras públicas, entre otros (Gallego-Picó *et al.*, 2012).

Las partículas suspendidas pueden jugar diferentes papeles en la atmósfera: contribuyen a la generación de reacciones entre gases, influyen en el balance radiativo de la Tierra y sirven de núcleos de condensación del vapor de agua para permitir la formación de las nubes. Este tipo de contaminantes presenta la capacidad de ser transportados desde decenas a cientos de kilómetros lejos de la fuente de origen y de permanecer en suspensión bastantes días, de modo que su efecto nocivo se puede extender hacia áreas colindantes, en donde la contaminación acarreada se suma a la producida por las fuentes locales (Ayuntamiento de Valladolid, 2021). No obstante, la dispersión del material particulado depende del tipo de contaminante, su tamaño, su fuente de emisión, la orografía del sitio y las características de los vientos.

Existen normativas internacionales y nacionales que establecen los límites permisibles de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en la atmósfera, así como criterios para su correcta medición y evaluación, con fines de protección para la salud humana y ecosistémica. Así, basándose en las evidencias de los efectos sobre la salud de la exposición a la contaminación del aire, las directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud sobre la calidad del aire (OMS,

2021) señalan una exposición de 24 horas de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una exposición promedio anual máxima de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM_{10} y de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las $\text{PM}_{2.5}$. Por su parte, la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 de Salud ambiental (DOF, 2021), señala que el límite diario permisible de la concentración de partículas suspendidas por PM_{10} es de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un promedio anual de los valores diarios de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y para $\text{PM}_{2.5}$ es de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

La concentración de los contaminantes en la atmósfera varía significativamente en el espacio y en el tiempo como consecuencia de la variación en las emisiones de contaminantes y en los factores meteorológicos que afectan las reacciones químicas de las sustancias y la dispersión de las mismas en la atmósfera, tales como, la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, la velocidad y dirección de los vientos, así como la estabilidad que predomina en la atmósfera (Ramos-Herrera *et al.*, 2010).

La temperatura juega un papel en las reacciones químicas que se dan en la atmósfera y, por lo tanto, en la formación de contaminantes secundarios (Ramos-Herrera *et al.*, 2010). La humedad relativa incide en la deposición húmeda de las partículas contaminantes, debido a que afecta la densidad de estas, así como sus propiedades físicas y químicas, reduciendo su resuspensión en la atmósfera (Rojano *et al.*, 2012), en específico las partículas finas ($< 10 \mu\text{m}$) son bastantes higroscópicas y la masa de agua en la fase de condensación se incrementa con la humedad relativa (Chakrabartia *et al.*, 2004). De acuerdo con Amador-Muñoz y colaboradores (2001), existe una correlación inversa entre la humedad relativa y las partículas suspendidas totales (PST) y la concentración de partículas suspendidas menores a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}). También, en este estudio se estableció que existe diferencia significativa entre la concentración en temporada de secas y de lluvias, siendo mayor la concentración en la temporada de secas. Finalmente, se puso de manifiesto la importancia de estudiar el comportamiento anual de la contaminación, ya que es importante en la exposición por periodos prolongados (Ramos-Herrera *et al.*, 2010).

La radiación solar favorece la formación de contaminantes secundarios mediante reacciones de oxidación fotoquímica. La precipitación arrastra los contaminantes al suelo, siendo también capaz de disolver algunos gases. La velocidad y dirección de los vientos afecta la concentración y dispersión de los contaminantes en el espacio (Ramos-Herrera *et al.*, 2010).

Por último, cabe mencionar que el material particulado presenta variaciones en su comportamiento a partir de la escala de tiempo a la cual se estudie, siendo las variables meteorológicas los principales factores que inciden en el cambio de las concentraciones, así como fenómenos como la inversión térmica (aumento de la temperatura con la altitud en una capa de la atmósfera) (SDA, 2021) que puede afectar a una escala horaria, así como también fenómenos extraordinarios como lo son las sequías, quemas o incendios en temporadas mensuales más puntuales.

3. Planteamiento del problema

La exposición a PM_{10} trae consigo diversos efectos a la salud, como el incremento en la incidencia de asma, deterioro de la función pulmonar, y el aumento de enfermedades respiratorias, además de síntomas comunes como dolores de cabeza, irritación ocular, malestar en la garganta y tos. También produce daños en la vegetación, reducción de la visibilidad, aumento en la producción de lluvia ácida, daño a los animales y cambios en la fotosíntesis de las plantas (Romero *et al.*, 2006; Querol, 2008).

El riesgo de problemas en la salud por PM_{10} depende de la concentración de estas partículas en la atmósfera, del tiempo de exposición a ellas y de la sensibilidad de las personas a estas partículas, por lo que, para evaluar este riesgo es indispensable conocer los niveles de contaminación atmosféricos y su permanencia en el tiempo. Estos niveles de contaminación han sido estudiados ampliamente en algunas partes del mundo como en Europa y Estados Unidos. Por ejemplo, se ha visto que en el centro de Europa las concentraciones promedio anual de partículas suspendidas son cercanas a los 40-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y en algunas zonas pueden llegar a tener valores diarios de hasta 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gallego-Picó *et al.*, 2012), mientras que en el norte de Europa las concentraciones son menores, rondando los 20 a 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En México se han realizado análisis de las concentraciones atmosféricas de partículas suspendidas para algunas ciudades grandes como la Ciudad de México (Bravo *et al.*, 2000), Monterrey (Aguirre López *et al.*, 2022) y Guadalajara (Fonseca-Hernández *et al.*, 2018), pero no ciudades de tamaño medio o pequeño, como es el caso de Morelia.

En el caso de la ciudad de Morelia, se ha estado monitoreando la concentración de partículas suspendidas en el Observatorio atmosférico de la ENES Morelia y en las estaciones del centro de la ciudad, pero no se ha realizado un análisis de la información generada, lo cual ha limitado el entendimiento de la problemática asociada a estos contaminantes.

Actualmente, los estudios que se han realizado en Morelia, Michoacán con los datos de concentraciones de PM_{10} , han sido para conocer las emisiones por tipo de fuente, que han mostrado que el uso de combustible utilizado en el sector industrial (diésel y combustóleo), las actividades de construcción, la industria de celulosa y papel, la combustión doméstica de leña, los incendios forestales y la labranza agrícola, son las principales fuentes de emisión de este contaminante dentro de la ciudad (SEMARNACC, 2015).

Por insuficiencia de datos en las estaciones de Centro Histórico y Ciudad Universitaria en Morelia, no ha sido posible establecer un patrón de comportamiento de las concentraciones del material particulado, debido a que éstas presentan datos intermitentes durante largos periodos de tiempo (SEMARNACC, 2015), de la misma forma, solo existen monitoreos de PM_{10} para

su posterior comparación con los niveles permitidos por las normas de calidad del aire; sin embargo, no existen estudios que analicen la variación temporal de estos niveles que permitan indagar más cerca sobre el comportamiento particular en las diferentes escalas de tiempo, al igual que para conocer su interacción con las variables meteorológicas que puedan afectar su dispersión o concentración.

La elaboración de este tipo de análisis permitiría conocer qué factores pueden influir sobre las concentraciones de partículas suspendidas en diferentes escalas de tiempo y permitiría profundizar aún más en la problemática y en la toma de acciones que se deberían de implementar para su control. Además, sentaría una línea base para posteriores análisis en el municipio, el cual está presentando cambios profundos en población, infraestructura, movilidad e industria.

4. Antecedentes

Para medir y evaluar el impacto de la contaminación del aire en la población, ecosistemas y recursos naturales, es indispensable contar con sistemas, redes y programas adecuados de medición de la calidad del aire. Con este fin, en México se han implementado los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire, que se han convertido en una herramienta para conocer los niveles de confiabilidad de la calidad del aire, respecto a contaminantes específicos, y formular con base en los datos obtenidos, las estrategias de control y las medidas oportunas y adecuadas para una efectiva gestión ambiental. A partir de esto, en el año 2016, el análisis de PM_{10} en 17 entidades federativas del país: Baja California, Chihuahua, Ciudad de México y su zona conurbada, Coahuila, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Puebla, Oaxaca, Querétaro, Veracruz y Yucatán, permitió identificar que los límites normados para protección de la salud se cumplieron en muy pocas ciudades, siendo Tulancingo y Zapotlán las únicas ciudades que no rebasaron el límite establecido de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (INECC, 2019)

En un estudio realizado por Zuk y col. (2007), se clasificaron nueve ciudades mexicanas de acuerdo con los niveles de contaminación registrados en 2005 para diferentes contaminantes, entre los que encontramos las PM_{10} . La clasificación responde a un indicador compuesto que pondera tanto la frecuencia de días en los que se excede el límite establecido en la norma de calidad de aire, como la magnitud de las concentraciones alcanzadas en cada ciudad o zona metropolitana. Se observó que las ciudades con un problema más serio de PM_{10} fueron Mexicali, la Zona metropolitana del valle de Toluca, la Zona metropolitana de Monterrey y Ciudad Juárez. En el resto de las ciudades, las concentraciones fueron menores, pero de igual forma rebasaron los límites permitidos nacionales e internacionales.

Un caso particular es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que ha sido pionera en cuanto a la gestión de calidad del aire. La contaminación atmosférica por PM_{10} está ligada con la densidad poblacional, el uso del suelo, el tamaño y el estado que guarda el parque vehicular (los motores de combustión interna), y con las características de los procesos industriales. En el caso de la ZMVM, los suelos desprovistos de pavimentación son la fuente principal de PM_{10} ; además, dentro del sector transporte, los vehículos a diésel, en sus diversas modalidades (vehículos de más de tres toneladas, tractocamiones y autobuses) emiten alrededor del 29% de las emisiones anuales junto con la industria mineral no metálica, la industria química y los productos de consumo de vida media (Tzintzun *et al.*, 2005).

En un reciente estudio, pionero en el análisis de la composición de muestras diarias de PM_{10} , recolectadas durante todo un año (2015-2016) en la ciudad de Bogotá, Colombia, se determinó que el principal componente químico del PM_{10} son las partículas de carbono (51%), las cuales se asociaron según la época del año

con incendios forestales, fuentes de combustión industrial y emisiones de vehículos a gasolina y diésel. Además, los investigadores señalaron que los valores promedio más bajos se obtuvieron durante periodos de lluvia y los valores pico durante periodos de sequía (Ramírez *et al.*, 2018).

En Morelia, Michoacán, los datos de PM_{10} del Anuario de Monitoreo atmosférico en el centro histórico (Correa-García, 2018) muestran que los promedios anuales de este contaminante se mantuvieron por debajo del límite de concentración que marca la norma entre el 2008 y el 2018. En este mismo trabajo, se observó que durante el periodo de 2008 al 2010 las PM_{10} mostraron promedios mensuales en otoño-invierno ligeramente menores ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que en abril y mayo ($51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$); desde entonces, hasta el año 2016 los niveles de PM_{10} registrados fueron menores, debido a un problema con el rango de operación del equipo de medición. Una vez corregido este problema, en 2018, se observó un incremento substancial en las concentraciones, dentro del rango observado en 2018. En esta ciudad, la Dirección de Medio Ambiente y Sustentabilidad (DMAS, 2017), atribuye el incremento de las PM_{10} en los meses enero, abril y mayo a la influencia de las quemas agrícolas, incendios forestales y quema de basura a cielo abierto que ocurren mayormente durante esta temporada.

Por otra parte, en un estudio sobre la exposición personal por partículas suspendidas en usuarios del transporte público en Morelia se reportó la presencia de hollín, que es un derivado de la quema de carbón, diésel, biocombustible y biomasa, así como de partículas de Potasio (K), Calcio (Ca), Sodio (Na) y Aluminio (Al) en el aire, las cuales, presumiblemente, pueden tener su origen en la erosión eólica de suelos naturales (Gonce-Rangel, 2014).

5. Preguntas de investigación

- a) ¿Cuál es el nivel de contaminación atmosférica promedio de PM_{10} en la ciudad de Morelia?
- b) ¿Cómo varían las concentraciones de PM_{10} a diferentes escalas de tiempo?
- c) ¿Qué factores influyen sobre los patrones de variación de las concentraciones de PM_{10} a diferentes escalas de tiempo?

6. Predicciones

- I. Se espera que el nivel de contaminación atmosférica por PM_{10} en la Ciudad de Morelia esté por debajo del nivel que presentan las ciudades más grandes y con mayor industria en México, encontrándose dentro de la norma.
- II. Se espera que los patrones de variación temporal se presenten de la siguiente manera:
 - a. Se espera que el promedio anual de PM_{10} no muestre una tendencia de cambio creciente ni decreciente, debido a que no se ha presentado un cambio significativo en el periodo de estudio en el parque vehicular, la actividad industrial, los parámetros meteorológicos o en las políticas públicas de calidad del aire, que pudieran afectar los niveles de PM_{10} en la ciudad.
 - b. Se espera que la variación de las concentraciones mensuales de PM_{10} , se vea afectada por los parámetros meteorológicos, como la precipitación pluvial, la temperatura y la velocidad del viento, los cuales pueden afectar la deposición y dispersión de los contaminantes atmosféricos.
 - c. Se espera que la variación de las concentraciones diarias de PM_{10} , se vea afectada por el comportamiento poblacional, siendo los días laborales los que registren las mayores concentraciones y los fines de semana las menores.
 - d. Se espera que la variación de las concentraciones horarias de PM_{10} , se vea afectada por el comportamiento poblacional, siendo las horas con mayor afluencia de personas las que registren las mayores concentraciones, como ejemplo, las horas de salida y entrada a centros laborales, educativos y comercio.
- III. Se espera que los parámetros meteorológicos de temperatura, humedad y velocidad del viento influyan sobre los patrones temporales de las concentraciones de PM_{10} , pero que su efecto varíe con la escala temporal de análisis.

7. Objetivos

Objetivo general:

Analizar los patrones temporales de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros en la ciudad de Morelia, Michoacán durante el periodo de 2016-2021.

Objetivos específicos:

- a) Determinar los niveles de contaminación por PM_{10} en la ciudad de Morelia, Michoacán, durante el periodo de 2016-2021.
- b) Conocer los patrones temporales de las concentraciones de PM_{10} a diferentes escalas de tiempo.
- c) Determinar qué factores meteorológicos influyen sobre los patrones de variación de las concentraciones de PM_{10} a diferentes escalas de tiempo.

8. Metodología

8.1. Descripción de la zona de estudio

El municipio de Morelia se localiza en la parte norte del estado de Michoacán de Ocampo, entre los paralelos 19°27'06" y 19°50'12" de latitud norte, y los meridianos 101°01'43" y 101°30'32" de longitud oeste, a una altitud promedio de 1,920 msnm. Cuenta con una superficie de 119,316.06 hectáreas, lo que representa el 2% del territorio estatal y el 29% de su región funcional de la cuenca del lago de Cuitzeo (INEGI, 2000) (**Figura 3**).



Figura 3. Mapa de localización del municipio de Morelia en el Estado de Michoacán. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI, 2022.

La extensión superficial de la ciudad se ha incrementado de manera significativa, en relación con su dinámica demográfica, la expansión de áreas urbanas y la formación de asentamientos humanos ha generado una pérdida de suelo fértil y fragmentación de los sistemas naturales, con afectaciones a la biodiversidad, la hidrología superficial y subterránea, incremento en la generación de gases contaminantes, mayor consumo energético y presión sobre el medio rural (IMPLAN, 2019).

8.2. Orografía

La superficie del municipio es muy accidentada. La región montañosa se extiende hacia el sur y forma vertientes bastante pronunciadas, que se internan al norte, sobresaliendo los cerros de Punhuato y las lomas antiguamente llamadas de El Zapote, que se unen en la región norte con la sierra de Otzumatlán. Al sur de la

ciudad de Morelia se encuentran las lomas de Santa María de los Altos; adelante están los cerros de San Andrés, que se unen, en la parte noroeste, con el pico de Quinceo que es el cerro más alto en la región con 2,787 metros sobre el nivel del mar, y que tiene conexión con las lomas de Tarímbaro y los cerros de Cuto y de Uruétaro, los cuales limitan al valle y los separan del lago de Cuitzeo (INAFED, 2010)

8.3. Clima

El clima de la ciudad de Morelia es templado con lluvias en verano. La precipitación promedio anual oscila entre 700 mm y 850 mm, con un promedio de 770 mm. Las mayores precipitaciones ocurren de junio a septiembre, siendo junio el mes más lluvioso (Gómez-Bermejo et al, 2012). La temperatura media mensual oscila entre los 14 y los 23 °C, registrando las temperaturas menores de noviembre a febrero y las mayores de abril a junio, con promedio anual de 17.7 °C.

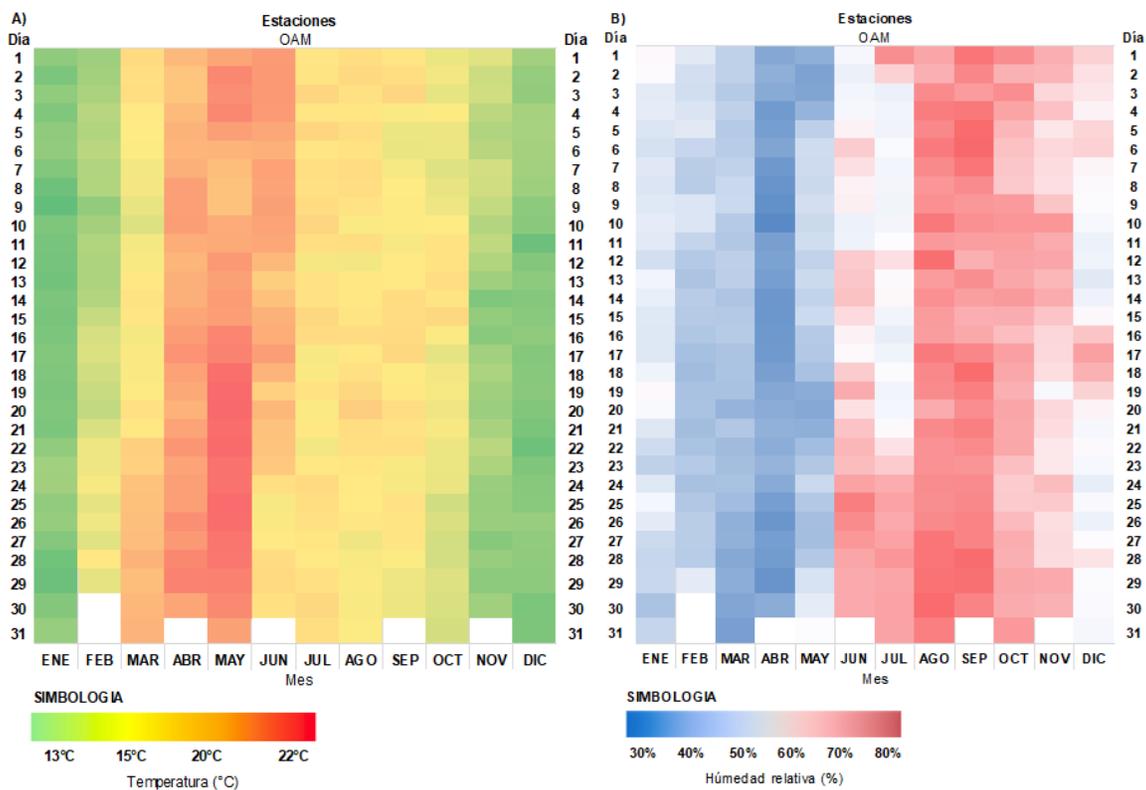
Los promedios de temperatura y humedad relativa durante el periodo de estudio fueron alrededor de 17 °C y 60% respectivamente (**Tabla 1**). La humedad relativa fue similar en los seis años de análisis, al igual que la temperatura, la velocidad del viento, presión barométrica y radiación solar.

Tabla 1. Valores promedio \pm error estándar de las principales variables meteorológicas reportadas para el Observatorio Atmosférico Morelia en el periodo de 2016 – 2021, en Morelia, Mich.

Año	Temp (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento promedio °A	Precipitación (mm/año)	Presión barométrica (hPa)	Radiación (W/m ²)
2016	17 \pm 0.05	62 \pm 0.24	1.9 \pm 0.13	159	561 \pm 0.006	807 \pm 0.002	226 \pm 3.3
2017	17 \pm 0.06	60 \pm 0.24	1.8 \pm 0.12	155	818 \pm 0.01	806 \pm 0.002	242 \pm 3.5
2018	17 \pm 0.06	61 \pm 0.28	1.7 \pm 0.13	156	1081 \pm 0.01	806 \pm 0.002	237 \pm 3.6
2019	18 \pm 0.05	62 \pm 0.24	1.6 \pm 0.14	161	560 \pm 0.007	806 \pm 0.002	247 \pm 3.6
2020	18 \pm 0.05	60 \pm 0.25	1.7 \pm 0.14	171	776 \pm 0.01	806 \pm 0.002	253 \pm 3.8
2021	17 \pm 0.05	62 \pm 0.26	1.6 \pm 0.14	173	716 \pm 0.007	806 \pm 0.002	246 \pm 3.6

Fuente: Elaboración a partir de datos del OAM.

En las **Figuras 4 A) y B)**, se presentan mapas de temperatura (°C) y humedad relativa (%) con sus promedios mensuales durante el periodo 2016-2021 del Observatorio Atmosférico Morelia.



Las temperaturas promedio mensuales más altas se presentaron en abril y mayo, con registros de hasta 22 °C. Por otra parte, las temperaturas más bajas se registraron en diciembre y enero, con valores de hasta 13 °C.

En el caso de la humedad relativa, los meses que presentaron los porcentajes más altos fueron agosto y septiembre, con promedios de hasta 80%. Por su parte los meses de abril y mayo fueron los que tuvieron los registros más bajos, llegando hasta el 30%, considerando estos tiempos más secos y cálidos.

Respecto a las lluvias, la mayor cantidad de precipitación se presentó durante el mes de agosto, seguido de los meses de julio, junio y septiembre (Figura 5).

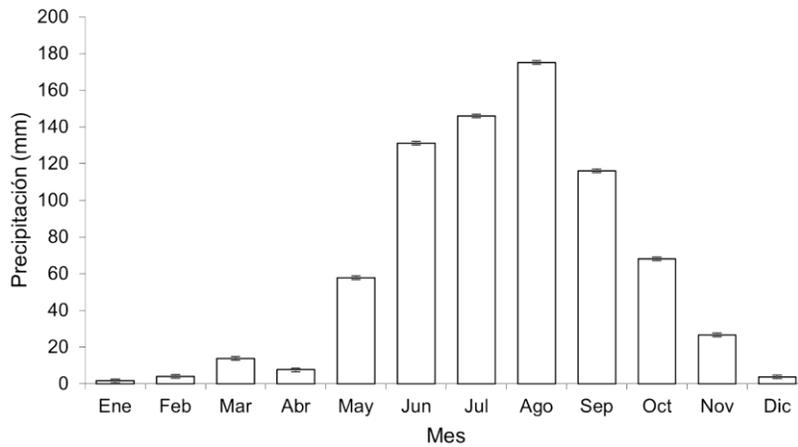


Figura 5. Precipitación mensual \pm error estándar del OAM, para el periodo de 2016-2021 en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

En la **Figura 6** se presentan las rosas de viento para el periodo de 2016-2021. La dirección predominante de manera anual fue proveniente del sur, sureste y suroeste, exceptuando el 2021, que tuvo direcciones del noreste, la mayor parte del año. Las velocidades de viento registraron promedios de alrededor de 0.5 a 3.6 m/s durante la mayor parte del año.

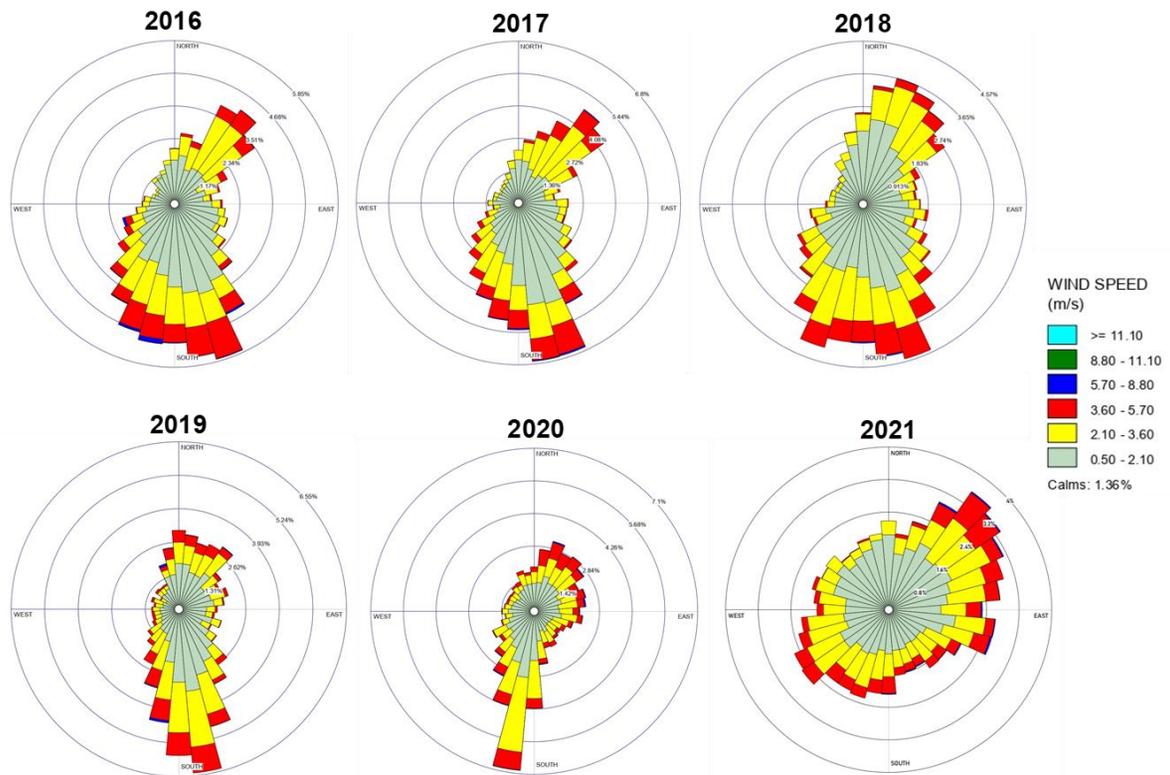


Figura 6. Rosas de viento del OAM, para el periodo de 2016-2021 en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos horarios provenientes del OAM.

8.4. Parque vehicular

De acuerdo con el Censo de Vehículos de motor registrados en circulación, de INEGI, 2022, el parque vehicular del estado de Michoacán de Ocampo, para el año 2021, rondaba cerca de las 2,631,755 unidades. Por su parte, el municipio de Morelia, para el mismo año, contaba con 553,077 unidades.

8.5. Población

De acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda del año 2020, de (INEGI, 2021), la población total en el estado de Michoacán de Ocampo era de 4,748,846 habitantes, por su parte el municipio de Morelia, para el mismo año, contaba con una población de 849,053 habitantes.

8.6. Zonas industriales

Actualmente, el sector industrial de Morelia, conocido también como “*Los antiguos Urdiales*” se localiza en la actual colonia industrial y extremo norte del centro histórico. Enfocados en su totalidad a la industria harinera, aunque también contiene almacenes, aceiteras, resineras, una subestación eléctrica y otros tipos de actividades (Gutiérrez Ayala, 2019). En la **Tabla 2** se presentan algunas de las instalaciones industriales ubicadas en Morelia, Michoacán.

Tabla 2. Instalaciones industriales en el municipio de Morelia, Michoacán.

Nombre de la industria y/o empresa	Principal actividad
Aarhus Karlshamn México S.A. de C.V.	Elaboración de aceites y grasas vegetales.
Fábrica de alimentos Team Foods México S.A. de C.V.	Elaboración de aceites y grasas vegetales comestibles.
Fabricación de paneles para cámaras de refrigeración.	Fabricación de espumas y productos de poliestireno.
El Pino.	Fabricación de otros productos químicos básicos orgánicos.
Quimic S.A. de C.V.	Fabricación de otros productos químicos básicos orgánicos.
Falcón Plastic de México S.A. DE C.V.	Fabricación de bolsas y películas de plástico.
Michoacana de plásticos S.A. de C.V.	Fabricación de bolsas y películas de plástico flexible.
Continental tire de México S.A. de C.V.	Fabricación de llantas y cámaras.
Fábricas la central S.A. de C.V.	Fabricación de cerillos.
Kimberly Clark de México.	Fabricación de papel a partir de pulpa.
Grupo papelerero Scribe S.A. de C.V.	Fabricación de papel a partir de pulpa.
Resinas sintéticas S.A. DE C.V.	Fabricación de resinas sintéticas.
Placoyt.	Fabricación de bolsas y películas de plástico flexible.
Infasa.	Fabricación de jabones, limpiadores y dentífricos.
Envases universales de México S.A.P.I. de C.V.	Fabricación de botellas de plástico.
Industrias poli plasticos de Michoacán S.A. DE C.V.	Fabricación de otros productos de plástico

Fuente: elaboración a partir del IMPLAN Morelia, 2019.

8.7. Caracterización del observatorio atmosférico

El Observatorio Atmosférico de Morelia (OAM), que forma parte de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos UNAM (RUOA), está ubicado en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, UNAM, iniciando sus operaciones en el año 2015 (**Figura 7**). El OAM, como los demás observatorios de la RUOA, registra datos en tiempo real, y los almacena en bases de datos con valores promedio o acumulados en períodos de un minuto, cinco minutos y una hora.



Figura 7. Observatorio Atmosférico Morelia (OAM), ubicado en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Michoacán, UNAM. Fuente: <http://www.ruoa.unam.mx/>

A continuación, se presentan las principales características del Observatorio Atmosférico Morelia (**Tabla 3**). Los métodos de medición para cada uno de estos contaminantes criterio se basan en el uso de analizadores automáticos, que aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes gaseosos para determinar su concentración (US-EPA, 2008).

Tabla 3. Características básicas del Observatorio Atmosférico Morelia (OAM), ubicado en la ENES, Morelia, Michoacán.

Estación	Coordenadas	Tipo de estación	Tipo de zona	Escala de representatividad	Contaminantes criterio						Variables meteorológicas				
					PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	NO ₂	SO ₂	CO	Temp.	HR	Viento	UV	Presión
OAM	19.6404 N, 101.2252 O	Automática	Urbana	Vecinal o local (500 a 4 km)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración a partir de datos obtenidos del INECC, 2019.

8.8. Métodos instrumentales de monitoreo de PM₁₀

Para cuantificar la concentración de partículas suspendidas de fracción respirable PM₁₀ y PM_{2.5}, en el OAM se usa un Monitor de Atenuación Beta PM₁₀ y PM_{2.5} Thermo FH62C14, certificado por la USEPA (Agencia de Protección al ambiente de los Estados Unidos por sus siglas en inglés) (**Figura 8**).

El funcionamiento de este monitor se basa en el principio de la atenuación beta, para medir concentraciones de partículas suspendidas. El área de colección de partículas atmosféricas del equipo está localizada entre una fuente de ¹⁴C (carbono 14) y un detector de radiación. Las partículas atmosféricas se depositan sobre una cinta de papel ubicada entre la fuente y el detector, de tal forma que la carga dinámica de las partículas depositadas es medida continuamente por la atenuación de los rayos beta de la fuente ¹⁴C. El equipo cuenta con una bomba de vacío que introduce a su interior una muestra de aire de volumen conocido a una tasa constante. De esta forma, el equipo permite determinar la concentración de partículas suspendidas en unidades de µg/m³ (Thermo Fisher Scientific, 2007).

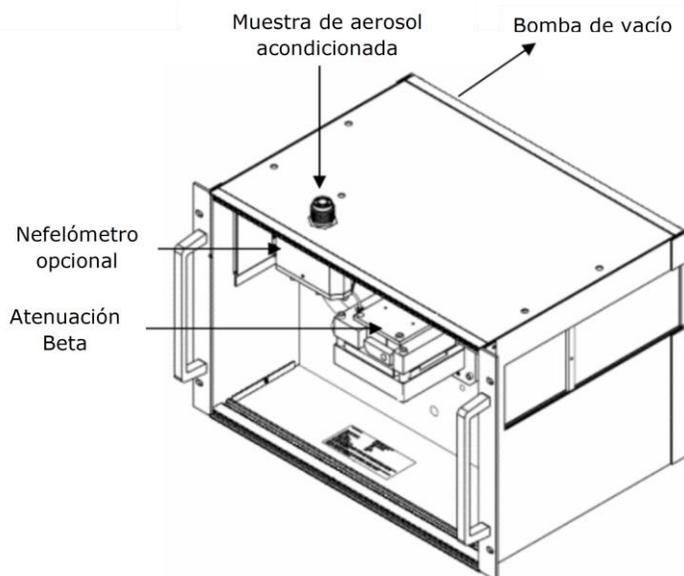


Figura 8. Partes del monitor continuo de partículas ambientales FH62C14. Fuente: Thermo Fisher Scientific, 2007.

Este monitor proporciona una concentración actualizada cada 4 segundos, pero los valores de concentración cíclica válidos se calculan como una concentración promedio de 1, 5, 30 y 60 minutos, se marca con la hora del día y la fecha y se almacena en la memoria interna. Si al menos 2/3 de las mediciones de concentración cíclica son válidas, el promedio se considera válido. La concentración mínima detectable es de <math><4 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> en tiempo de resolución de una

hora y de $<1 \text{ ug/m}^3$ en tiempo de resolución de 24 horas. La precisión de los valores en 24 horas es de $\pm 2 \text{ ug/m}^3$ (Thermo Fisher Scientific, 2007).

8.9. Métodos instrumentales de monitoreo de variables meteorológicas

El sistema de monitoreo meteorológico consiste en el uso de instrumentos como: anemómetro, piranómetro, termohigrómetro, pluviómetro, todos ellos enlazados a un equipo de adquisición de datos, con conexión en tiempo real a la red.

8.10. Validación y análisis de datos

El proceso de validación de datos consiste en la revisión sistemática e identificación de datos irregulares o comportamientos temporales/estacionales anómalos de las partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}), así como de los datos ausentes o irregulares, debido al mal funcionamiento del instrumento de medición. En comparación con los datos de PM_{10} , la base de datos de las variables meteorológicas no requirió de ningún procedimiento de validación, únicamente se verifica que los registros no sean anómalos o fuera de rango. Se realizó una depuración de datos anómalos de forma manual y con funciones del software Excel, eliminando valores números negativos, datos faltantes y números fuera de rango, también llamado “outliers” o “null”. Esta información puede aparecer debido a fallas en los instrumentos de medición, en el sistema eléctrico o de comunicación y por la calibración o cambios en el sensor/equipo.

8.11. Procedimientos estadísticos

Antes de realizar el análisis estadístico correspondiente se requiere que existan los datos suficientes para dicho análisis, donde se toma en cuenta las consideraciones siguientes según el Diario Oficial de la Federación (2021):

- a) En el sitio de monitoreo, la concentración promedio de 24 horas de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ se reportará en $\mu\text{g/m}^3$, sin cifras decimales. Si se cuenta con valores de una o más cifras decimales, el valor es redondeado. Si el primer decimal es un número entre 0 y 4, el valor entero no se incrementa; si es mayor, se incrementa al inmediato superior.
- b) Para el cálculo del promedio de 24 horas de cada día se requiere un mínimo de 75% de las concentraciones horarias válidas (18 registros).
- c) Para el cálculo del promedio anual se requiere de un mínimo de datos en 1 año calendario. Este mínimo se evalúa a partir de la cantidad de muestras de 24 horas válidas obtenidas en cada uno de los 4 trimestres del año.
- d) Para cada trimestre se requiere un mínimo de 75% de muestras válidas.

Variación anual

En esta escala se calculó el promedio de concentración de PM_{10} para cada año y se procedió a analizar la variación entre años a través de un análisis de varianza (ANOVA).

Variación mensual

Para esta escala se procedió a calcular los promedios mensuales de concentración de PM_{10} del periodo de 2016 a 2021; para conocer la relación entre las variables meteorológicas y la concentración de PM_{10} , se realizó un análisis de correlación entre las concentraciones de PM_{10} y los parámetros meteorológicos y a partir de esto se desarrolló un análisis de regresión múltiple por pasos “backward” para analizar la contribución de dichas variables a la variabilidad mensual de las concentraciones de PM_{10} .

Variación diaria

Para esta escala se procedió a realizar un gráfico de distribución de frecuencias con los promedios diarios de concentración de PM_{10} para identificar cuáles son las concentraciones más frecuentes, de la misma forma se elaboró un gráfico de caja y bigote distribuido por año, así como un gráfico de barras con las concentraciones promedio de cada uno de los días de la semana para analizar la existencia de algún patrón entre días de la semana.

Variación horaria

En esta escala se procedió a obtener los promedios horarios de PM_{10} para las diferentes temporadas del año: cálida (marzo, abril y mayo), lluvia (junio, julio, agosto y septiembre) y fría (enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre), y se graficaron para analizar la existencia de algún patrón horario.

Rosas de viento

Para analizar el efecto de los vientos sobre las concentraciones de PM_{10} e identificar el comportamiento vectorial del viento en el lugar del monitoreo, representando la dirección, la intensidad y la frecuencia, se generaron las rosas de viento para cada año del estudio, mediante el uso del Software WRPLOT View 8.0.2.

9. Resultados

9.1. Variación anual

El promedio anual de concentración de PM₁₀ para la estación de monitoreo OAM, osciló entre los 21 y 24 µg/m³ durante el periodo de estudio, con un valor promedio de 23 µg/m³ para los seis años (**Tabla 4**). No obstante, es importante mencionar que, durante dos años del periodo (2017 y 2018) existió una insuficiencia de datos para la elaboración de un análisis más completo, esta falta de datos se debió a la descompostura temporal del equipo analizador.

Tabla 4. Estadísticas básicas de PM₁₀ ± error estándar, de la estación de monitoreo OAM, Morelia, Mich. Los valores en **negrita** indican insuficiencia de datos (<75% de datos válidos para la elaboración de un análisis).

Año	Porcentaje de captura (%)	Datos capturados	Promedio anual (µg/m ³)
2016	98	8650	23 ± 0.17
2017	69	6070	24 ± 0.19
2018	73	6345	22 ± 0.16
2019	99	8630	22 ± 0.15
2020	91	8024	21 ± 0.13
2021	88	7691	23 ± 0.16

Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

El análisis de varianza (ANOVA) mostró que la concentración anual de PM₁₀ no varió significativamente entre años. (F=0.26; gl = 5, 58; P= 0.93)

9.2. Variación mensual

Los promedios mensuales de concentración de PM₁₀ variaron notablemente entre los meses, con un intervalo de variación entre 13 y 35 µg/m³ (**Figura 9**). Los meses que registraron las concentraciones más altas de material particulado fueron: abril y mayo, pertenecientes a la temporada cálida. Por otra parte, los meses con los registros de concentración más bajos fueron agosto y septiembre, correspondientes a la temporada de lluvia.

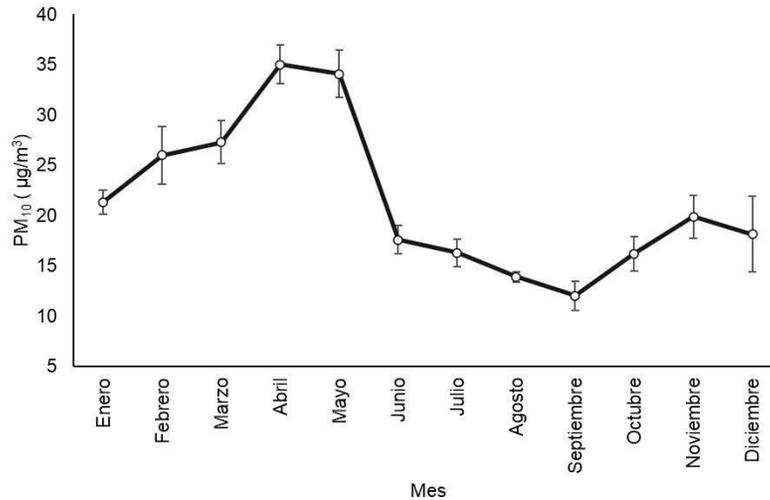


Figura 9. Promedios mensuales de PM₁₀ ± error estándar, durante el periodo de 2016-2021 en el OAM, ubicado en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

Los análisis de correlación entre las variables meteorológicas y la concentración de PM₁₀, mostraron que las concentraciones mensuales de PM₁₀ presentan una relación positiva con la temperatura [$r = 0.365$; $t(2)62 = 3.08$; $P = 0.003$] y la velocidad del viento [$r = 0.676$; $t_2(62) = 7.23$; $P < 0.001$] y una relación negativa con la humedad relativa [$r = -0.839$; $t(2)62 = -12.14$; $P < 0.001$]. ;

Además del análisis de correlación se realizó un análisis de regresión múltiple por pasos “backward” donde se observó que solo la humedad relativa presentó un efecto significativo sobre la concentración mensual de material particulado, explicando ella sola el 70% de la variabilidad de las concentraciones mensuales de PM₁₀ ($R^2 = -0.70$; $F = 147.50$; $g.l. = 1, 64$; $p < 0.000$) (**Figura 10**).

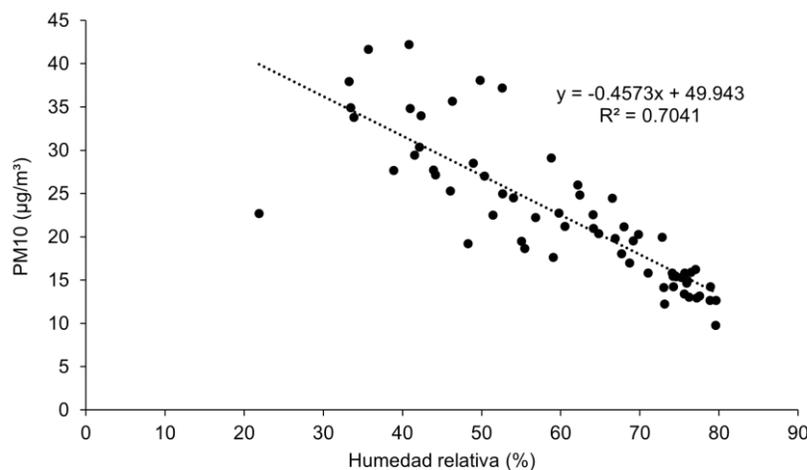


Figura 10. Análisis de regresión lineal entre los registros mensuales de PM₁₀ y humedad relativa, durante el periodo de 2016-2021 en el OAM, ubicado en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

9.3. Variación diaria

De acuerdo con la distribución de frecuencias de los promedios diarios de concentración de PM_{10} , el 67% de los datos se distribuyeron en los intervalos de 20 a 30 $\mu g/m^3$ (**Figura 11**).

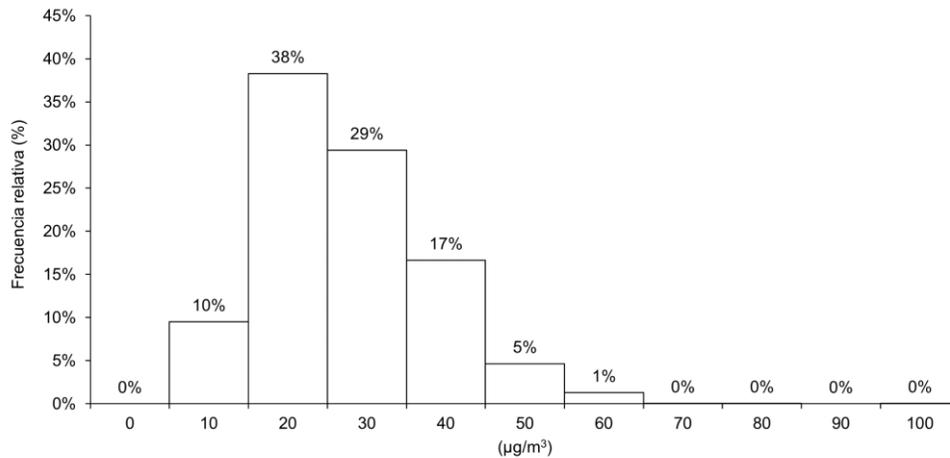


Figura 11. Distribución de frecuencias relativas (%) de PM_{10} durante el periodo de 2016–2021 en Morelia, Michoacán. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

La **Figura 12** presenta un gráfico de caja y bigote de las concentraciones promedio diarias de PM_{10} , distribuidas por año, para el periodo de tiempo de 2016 a 2021, así como su comparativa con el límite nacional establecido por la NOM-025-SSA1-2021 y las directrices de la OMS, 2021.

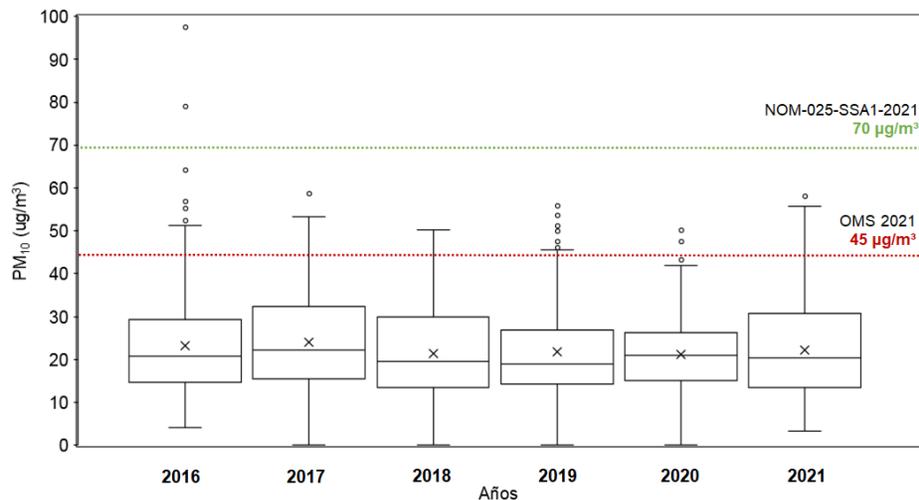


Figura 12. Gráfico de caja y bigote de las concentraciones promedio diarias de PM_{10} , para el periodo de 2016 a 2021 en Morelia, Michoacán, y su comparativa con los límites permisibles por la norma nacional “NOM-025-SSA1-2021” (línea verde) y las directrices de la OMS, 2021 (línea roja). Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

Durante la mayor parte del periodo del 2016 al 2021, las concentraciones promedio diarias de PM₁₀ se registraron por debajo del límite permisible nacional, que es de 70 µg/m³, con excepción del año 2016 que registró dos eventos atípicos importantes, con valores de 98 y 79 µg/m³. Por otra parte, el número de días con valores de concentración superiores a los 45 µg/m³, establecidos por las directrices de la OMS 2021, fueron en alrededor de 63 días a lo largo del periodo estudiado.

En la **Figura 13** se presentan las concentraciones diarias de PM₁₀ a partir de los días de la semana para cada temporada del año durante el periodo de 2016 a 2021, en esta se analizó un mes representativo de la temporada cálida (marzo), lluvia (julio) y fría (diciembre).

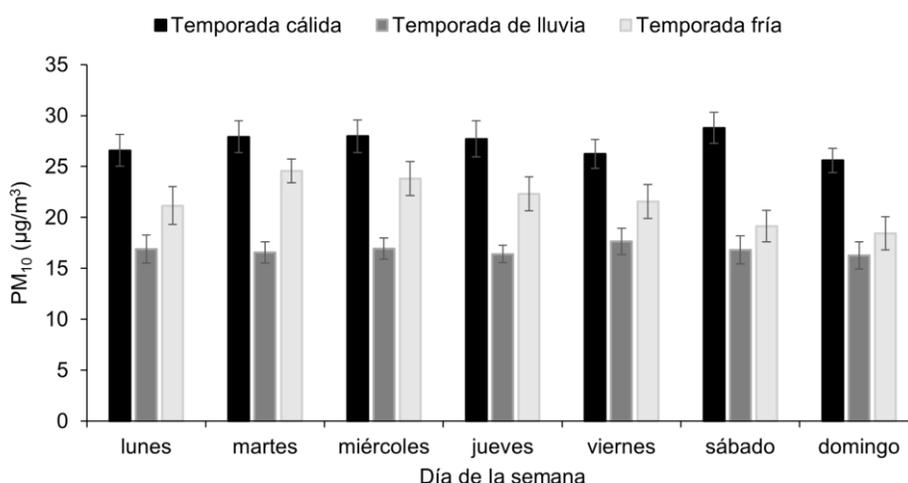


Figura 13. Concentraciones promedio diarias de PM₁₀ ± error estándar, a partir de los días de la semana para cada temporada del año durante el periodo de 2016 a 2021, para la estación OAM, del municipio de Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

No se presentaron cambios significativos en las concentraciones a lo largo de la semana, sin embargo, se visualiza que las concentraciones de la temporada cálida son mayores en comparación con las otras dos temporadas, con registros en promedio de 27 µg/m³, por otra parte, las concentraciones de la temporada de lluvia fueron las más bajas con registros en promedio de 17 µg/m³.

9.4. Variación horaria

La **Figura 14** presenta los promedios horarios de PM₁₀ para las diferentes temporadas del año: cálida (marzo, abril y mayo), lluvia (junio, julio, agosto y septiembre) y fría (enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre), durante el periodo de 2016 a 2021 para el municipio de Morelia, Michoacán.

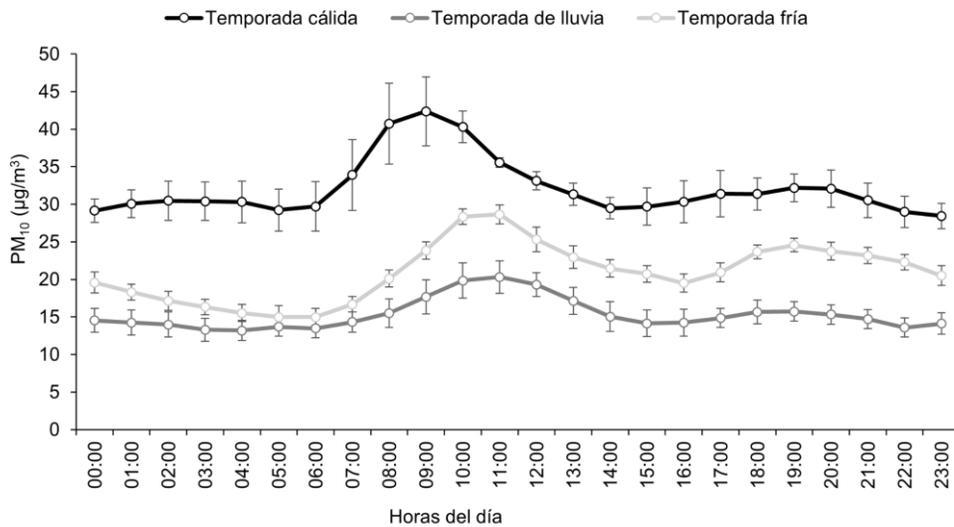


Figura 14. Series de tiempo de las concentraciones horarias de PM₁₀ ± un error estándar, para cada temporada del año durante el periodo de 2016 a 2021, para la estación OAM, del municipio de Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

La variabilidad horaria de PM₁₀ se caracteriza por tener altas concentraciones entre las 8:00 y 10:00 de la mañana en la temporada cálida y para las temporadas fría y de lluvia, entre las 10:00 y 11:00 del día. Las concentraciones presentan disminuciones durante la madrugada, sin embargo, muestran valores similares a las presentadas durante la tarde y noche.

10. Discusión

10.1. Variación anual

La concentración promedio anual de PM_{10} no presentó una tendencia de cambio creciente ni decreciente durante el periodo de estudio, sugiriendo que no ha habido cambios significativos en las principales fuentes de emisión de PM_{10} o de sus precursores en el municipio de Morelia durante el periodo de estudio. El valor promedio ($23 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se ubicó por debajo del valor límite de la Norma Oficial Mexicana de Salud Ambiental “NOM-025-SSA1-2021”, que es de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero por arriba de las directrices de la Organización Mundial de la Salud, 2021, que es de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Si consideráramos la concentración de este contaminante como un semáforo de alerta de contaminación atmosférica, se podría decir que la contaminación es, términos generales, regular, con un color amarillo de alerta (Figura 15).

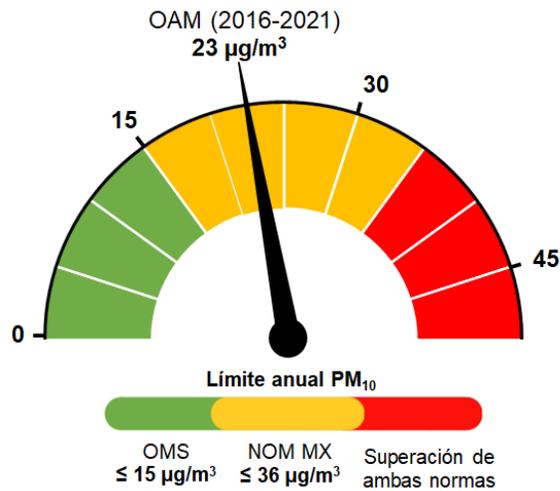


Figura 15. Odómetro vectorial de contaminación para el promedio anual de PM_{10} de la estación OAM durante el periodo de 2016 a 2021, en comparación con el límite nacional (color amarillo) y el límite internacional de las OMS (color verde), para el municipio de Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos de la OAM.

Un caso muy particular se registró en el año 2020, donde se registró la concentración más baja del periodo con $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, esto pudiera explicarse debido a la pandemia por COVID-19, que ocurrió a inicios de ese mismo año e incentivó la implementación de medidas de seguridad sanitaria, entre ellas la cuarentena obligatoria en muchas partes del país, que repercutió en la movilidad y actividades económicas poblacionales. Como caso paralelo tenemos a la Zona Metropolitana del Valle de México que pasó de registrar $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el 2018 y 2019, a registrar $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el 2020 (Espinoza Carraso & Li Ng, 2022).

En comparación con los valores de PM_{10} registrados en las estaciones del centro del municipio de Morelia, se puede observar que para el periodo de 2016 a 2021,

la estación de monitoreo del Palacio Municipal de Morelia presentó concentraciones promedio anuales de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo los años de 2018 y 2019 los que cuentan con los promedios más altos de 37 y $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Para el 2020 y 2021 los valores fueron de $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el caso del 2016 y 2017 no hubo datos disponibles para el análisis. En el caso de las estaciones de Ciudad Universitaria y el Laboratorio Estatal de Salud Morelia, no contaron con datos suficientes para su interpretación (Correa-García, 2022).

En este sentido, las concentraciones promedio anuales registradas por la estación OAM se encuentran por debajo de los registros del centro de la ciudad, esto posiblemente explicado por la ubicación de la estación, ya que al localizarse las demás estaciones en zona céntrica, con alta densidad poblacional y alta actividad económica, industrial y vehicular, se incide en el aumento y acumulación de las concentraciones de material particulado. En el caso de la estación OAM, esta se encuentra en una zona de baja densidad poblacional, con baja actividad industrial, económica y vehicular y con mayor presencia de vegetación en la zona, lo cual podría incidir en el nivel de las concentraciones, registrando valores más diluidos en comparación con otros sitios. Otro fenómeno importante para considerar es la predominancia de los vientos del sur, que al provenir de zonas boscosas y de menor producción de contaminantes de fuentes móviles e industriales, registra menores niveles de contaminación, sin embargo, es importante considerar que al presentar fenómenos como incendios forestales y quemas agrícolas en la periferia, incide en el incremento de las concentraciones durante días y horas específicas, como se muestra más adelante.

Otras de las principales causas del incremento de las concentraciones de material particulado en Morelia, se relaciona con sus fuentes de emisión, siendo estas, pertenecientes en gran parte a la categoría de fuentes de área, que consisten en comercios, servicios, combustión doméstica, asfaltado de carreteras, uso de solventes, incendios agrícolas y forestales, suspensión de polvos, distribución de combustibles, entre otros (SEMARNAT, 2019) (**Tabla 5**).

Tabla 5. Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio, Morelia Michoacán.

Tipo de fuente	Ton/año						
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COV	NH ₃
Fijas	195.56	146.28	616.41	99.31	215.2	12.27	4.29
Móviles	958.88	877.54	506.7	92,396.43	17,240.89	7,912.96	130.41
Área	1,056.31	631.72	45.28	5,334.25	310.83	7,391.85	2,493.23

Fuente: SEMARNAT, 2019.

Bajo este contexto, el promedio anual del periodo de 2016 a 2021 en Morelia, Michoacán se encuentra por debajo de los límites anuales de ciudades como Monterrey ($49 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la Zona Metropolitana del Valle de México ($43 \mu\text{g}/\text{m}^3$), León Guanajuato ($44 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Naucalpan de Juárez, Estado de México ($39 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

(INECC, 2019), ante esto podemos decir que, si bien los registros no superan el límite nacional y es más bajo en comparación con otras ciudades, si presenta valores por arriba de las normativas internacionales, que enmarcan la importancia de mantener las concentraciones de material particulado, como PM_{10} , por debajo de los límites diarios ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y anuales ($36 \mu\text{g}/\text{m}^3$), para evitar así problemáticas a la salud poblacional y ecosistémica.

Por otra parte, un análisis de regresión entre las PM_{10} y las $PM_{2.5}$ con datos del OAM muestra que, en promedio anual, alrededor del 62% de las PM_{10} está comprendida por partículas menores a 2.5 μg (**Figura 16**), por lo que si consideramos esto, la concentración promedio anual de $PM_{2.5}$ puede estar por encima de la norma mexicana ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en todos los años de este estudio ($23 * 0.62 = 14.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Es importante recalcar que no sólo es importante la concentración total de PM_{10} sino también el tipo de partículas y su toxicidad, para tener un panorama más completo de esta problemática. Cabe mencionar que, de acuerdo con el Instituto de Métricas y Evaluación Sanitarias, en el 2019, la contaminación del aire causó un total de 1,962 muertes prematuras en el estado de Michoacán, siendo la 8ª causa de riesgo en el estado (IHME, 2019).

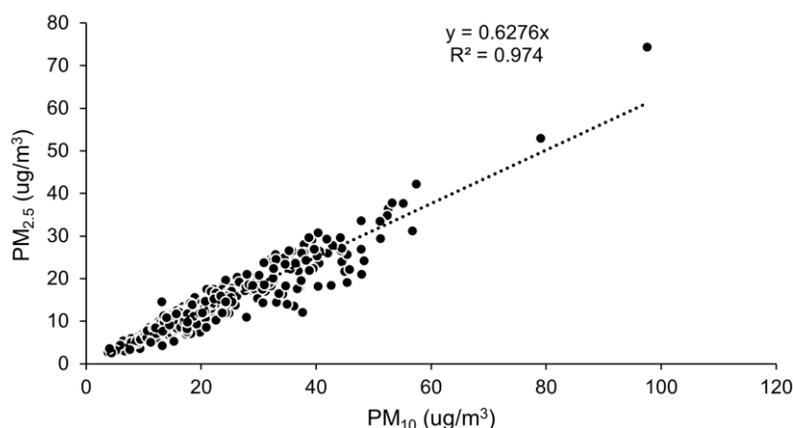


Figura 16. Análisis de regresión lineal entre los registros diarios de PM_{10} y $PM_{2.5}$, durante el periodo de 2016-2021 en el OAM, ubicado en Morelia, Mich. Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

10.2. Variación mensual

En el caso del comportamiento de PM_{10} a escala mensual, puede explicarse, en parte, a través de la meteorología de las temporadas que incide en la dinámica de la atmósfera y repercute en los niveles de concentración de material particulado. En el caso de la época de sequía, la disminución de lluvias, así como el incremento de las temperaturas, incide en la acumulación de contaminantes. De la misma forma, durante los meses de marzo a abril se llevan a cabo quemas

agrícolas en las periferias de la ciudad, lo que causa grandes emisiones de partículas, al igual que una resuspensión de polvos considerable (Comisión Nacional Forestal, 2023). En un estudio elaborado por Chacón-Rivera, 2015 se encontró que existe una relación directa entre la cantidad de incendios forestales producidos en las ciudades y el aumento de las concentraciones de material particulado, determinando que estos fenómenos suelen ocurrir con mayor frecuencia durante las épocas secas y de baja precipitación.

En el caso de la temporada de lluvias, se lleva a cabo un proceso denominado “deposición húmeda” donde las sustancias químicas y partículas son (como su nombre lo indica) depositadas en la superficie a través del agua proveniente de la lluvia, nieve o neblina, lo que puede explicar la disminución de la concentración de PM_{10} .

En este estudio, la manera de ratificar la relación entre el material particulado y la meteorología del sitio fue a través de un análisis de regresión múltiple, el cual permitió conocer que la humedad relativa influye de manera negativa sobre las concentraciones de PM_{10} a escala mensual. Este resultado se puede explicar a través de lo mencionado por Fierz-Schmidhauser (2010), donde establece que la humedad relativa influye en el contenido de agua de las partículas y por lo tanto tiene un impacto en la capacidad de dispersión de estas. La cantidad de agua en las partículas se incrementa rápidamente cuando la humedad relativa está por encima de aproximadamente el 70%, lo que incide en su deposición atmosférica (Rojano et. al., 2012).

Al comparar las concentraciones registradas en las estaciones del centro de Morelia con las del OAM, se encuentra un comportamiento similar, con incrementos durante los meses de marzo a mayo; sin embargo, en la mayoría de las estaciones se presentó una insuficiencia de datos a lo largo del periodo, lo que imposibilita conocer más a fondo estos procesos (Correa-García, 2022).

En comparativa con otras ciudades, cómo Naucalpan de Juárez, Estado de México, que cuenta con una población similar a la ciudad de Morelia (**Figura 17**), muestra una estacionalidad semejante, teniendo incrementos relevantes durante los meses de marzo y abril y presentando disminuciones durante el mes de junio hasta septiembre, a diferencia de Morelia, esta cuenta con incrementos importantes a finales de año, como noviembre y diciembre, pudiendo esto relacionarse a su cercanía con la Ciudad de México y al ser parte importante de la zona industrial del Estado de México; además, durante estas fechas, se suelen presentar aumentos significativos en la cantidad de población e incremento en el uso de artefactos pirotécnicos.

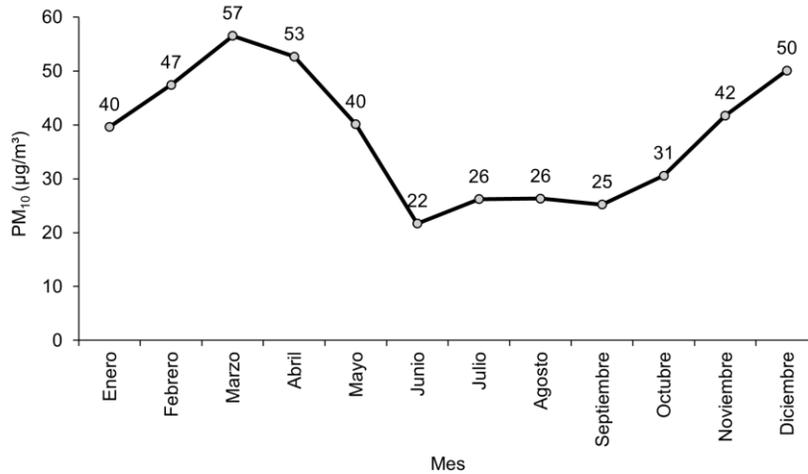


Figura 17. Promedio mensual de la concentración horaria del monitoreo continuo de PM₁₀ en Naucalpan de Juárez, Estado de México, para el año 2023. Fuente: SEDEMA, 2023.

De la misma forma, la ciudad de León, Guanajuato presenta también un comportamiento similar a la ciudad de Morelia, esto en relación con las bajas concentraciones durante los periodos de precipitación (**Figura 18**). Ambas ciudades a su vez, muestran cierta diferencia en relación con los registros más altos durante la temporada de sequía, pudiendo relacionarse principalmente al tipo de urbe y a incendios forestales ocurridos con mayor frecuencia en Morelia (**Tabla 6**). Por ejemplo, de acuerdo con la Comisión Nacional Forestal, tan sólo en el 2016 se reportaron en Michoacán 343 incendios que afectaron 4 mil 865.21 hectáreas, donde tan solo 53 incendios ocurrieron en Morelia, la gran mayoría de los incendios se presentaron en zonas de vegetación secundaria y una mínima parte en zonas de árboles adultos o de renuevo, durante los meses de la temporada cálida, principalmente de marzo a abril.

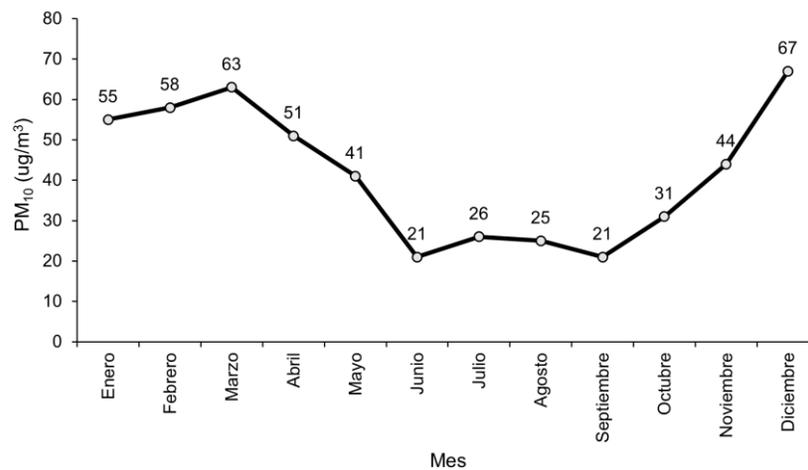


Figura 18. Promedio mensual de la concentración horaria del monitoreo continuo de PM₁₀ en la ciudad de León, Guanajuato, para el año 2021. Fuente: SEICA, 2021.

Tabla 6. Promedios mensuales de PM₁₀ de Morelia (OAM), Naucalpan de Juárez y León, Guanajuato.

Mes	Promedio mensual por ciudad ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Morelia (OAM)	Naucalpan de Juárez	León
Enero	21	40	55
Febrero	26	47	58
Marzo	27	57	63
Abril	35	53	51
Mayo	34	40	41
Junio	17	22	21
Julio	17	26	26
Agosto	14	26	25
Septiembre	13	25	21
Octubre	17	31	31
Noviembre	20	42	44
Diciembre	21	50	67

Fuente: OAM, s.f.; SEDEMA, 2023; SEICA, 2021.

10.3. Variación diaria

El promedio de concentración diario de PM₁₀ se encuentra por debajo de la normatividad, tanto de la Norma Oficial Mexicana ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como de OMS,2021 ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Durante el periodo de estudio sólo alrededor del 6% de los días presentó concentraciones mayores que el límite de la normatividad de la OMS. Lo cual indica que, en general, la contaminación por PM₁₀ en la zona sur de Morelia es moderada.

Por otra parte, la variación diaria de PM₁₀ no se vio afectada por el día de la semana independientemente de la temporada del año, lo que difiere con la hipótesis original, que establece que la variación de las concentraciones diarias sería afectada por el comportamiento poblacional. Esto puede sugerir que la dinámica de las concentraciones de PM₁₀ depende de múltiples factores, siendo las emisiones generadas por la actividad humana uno de ellos y no presentando una contribución significativa en este caso de variación a escala diaria.

Así mismo, la temporada cálida es la que registró las mayores concentraciones de material particulado, teniendo valores diarios de hasta $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este caso en particular, cabe mencionar, que fue en esta temporada donde se registraron los principales eventos atípicos, teniendo registros que superaron el límite establecido en la Norma Oficial Mexicana ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con valores de $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 04 de abril y de $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 03 de mayo, ambos del año 2016. Esto puede explicarse por la presencia de incendios forestales aledaños a la estación de monitoreo, como ejemplo a esto, tenemos que para el día 04 de abril de 2016, se registró cerca de la estación un incendio forestal, que explicaría los altos registros (**Figura 19**).

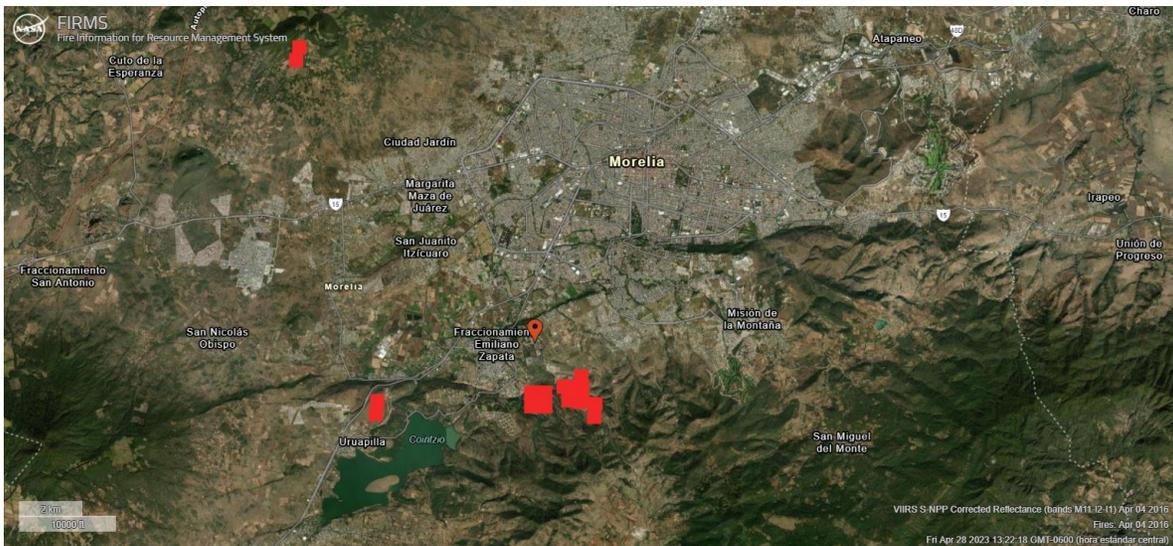


Figura 19. Imagen satelital de los incendios forestales y/o agrícolas registrados durante el día 04 de abril de 2016 en el municipio de Morelia, Michoacán. Nota: los cuadros de color rojo representan los incendios registrados durante el día de consulta; la ubicación de la estación de monitoreo OAM se visualiza con un icono de localización. Fuente: NASA, 2016.

Comparado con otras ciudades, Morelia presenta las concentraciones promedio diarias más bajas, como ejemplo, la ciudad de Monterrey presenta registros promedio diarios de $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, León de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SEMARNAT, 2020) y la Ciudad de México registros promedio de $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SEDEMA, 2023), siendo la Zona Metropolitana del Valle de México la que presenta eventos de concentración altos más continuos, siendo así que para el periodo de 2016 a 2021 se presentaron en total 27 contingencias atmosféricas en la zona (SEDEMA, 2023).

10.4. Variación horaria

El patrón de variación horario puede explicarse a través del proceso de inversión térmica, que se produce durante la noche y madrugada, a través de un enfriamiento del suelo y las capas bajas de la atmósfera por un proceso de convección (la temperatura en vez de disminuir con la altitud aumenta ligeramente), en esta situación las capas de aire no se mezclan y la contaminación se concentra en la capa más cercana al suelo. De la misma forma, debido a este enfriamiento, se produce la presencia de calmas que impiden la dispersión de los contaminantes y por lo tanto su concentración (SDA, 2021).

Durante las primeras horas de la mañana, el incremento de las actividades de la población hace que se acumulen más contaminantes, teniendo un pico de contaminación importante entre 9 y 11 AM. Con el incremento de la radiación a lo largo de la mañana se empieza a calentar el suelo y por convención la capa baja de la atmósfera, generando así turbulencia y restableciendo la circulación normal, ayudando a la dispersión de los contaminantes.

Además, a esta situación atmosférica, hay que añadir el aumento de las emisiones durante esas horas del día, por el comienzo de la actividad humana (SDA, 2021 & Hayas-Barrú,1991). De la misma forma, la disminución de las concentraciones durante la media de la tarde se debe a la estabilización que sufren las capas bajas de la atmósfera por enfriamiento, así como por procesos de dispersión (Hayas-Barrú, 1991).

En un estudio de Vázquez y colaboradores (2012), se muestra que para el comportamiento de las partículas suspendidas en el Valle de México, se suelen registrar los picos de mayor contaminación entre las 9:00 y 10:00 de la mañana, relacionándolo con periodos en los que se presenta el mayor tránsito de personas y vehículos, correspondiente al inicio y fin de las actividades de escuelas, oficinas y centros de comercio, aunado a procesos de inversión térmica. De la misma forma, Reina y col. del 2013, exponen que en la ciudad de Cali, Colombia, el comportamiento diurno del material particulado suele ascender alrededor de las 8:00 y 11:00 de la mañana, explicando así el efecto causado por las fuentes vehiculares en este horario. Otra ciudad que presenta un comportamiento similar, es Naucalpan de Juárez, Estado de México que muestra aumentos relevantes de concentración a partir de las 8:00 a 10:00 AM, y descensos a partir del mediodía (SEDEMA, 2023).

Conocer los patrones temporales con los mayores niveles de contaminación, permite minimizar el impacto de la contaminación del aire a la salud, estableciendo momentos de tiempo específicos que pueden ser dañinos a corto y mediano plazo para ciertas poblaciones vulnerables o para la población en general (**Tabla 7**).

Tabla 7. Resumen de los promedios anuales, mensuales, diarios y horarios de PM₁₀ durante el periodo de 2016-2021 en el OAM, ubicado en Morelia, Mich.

Año	Concentraciones promedio mensuales de PM ₁₀ (µg/m ³)												Promedio anual											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre												
2016	18	36	19	42	37	18	15	16	16	20	20	22	23											
2017	24	25	27	34	38	21	16	13	6	-	-	-	24											
2018	-	-	30	34	29	16	23	13	11	12	14	19	22											
2019	23	23	27	35	42	17	15	14	15	13	16	20	22											
2020	19	18	25	28	29	21	14	14	13	20	25	21	21											
2021	22	28	35	38	28	12	15	13	10	15	25	25	23											
Promedio mensual	21	26	27	35	34	17	17	14	13	17	20	21												
Concentraciones promedio diarias de PM ₁₀ por temporada del año (µg/m ³)																								
Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Promedio																
Cálida	27	28	28	28	26	29	26	27																
Lluvia	17	17	17	16	18	17	16	17																
Fría	21	25	24	22	22	19	18	22																
Concentraciones promedio horarias de PM ₁₀ por temporada del año (µg/m ³)																								
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Cálida	29	30	30	30	29	30	30	34	41	42	40	36	33	31	29	30	30	31	31	32	32	31	29	28
Lluvia	15	14	14	13	13	14	13	14	16	18	20	20	19	17	15	14	14	15	16	16	15	15	14	14
Fría	20	18	17	16	16	15	15	17	20	24	28	29	25	23	21	21	19	21	24	25	24	23	22	20

Fuente: elaboración a partir de datos provenientes del OAM.

11. Conclusiones

Esta investigación indica que el promedio de las concentraciones de material particulado PM_{10} , monitoreado en el Observatorio Atmosférico Morelia, osciló entre 21 y 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el periodo 2016-2021, estando estos valores por debajo del límite anual permitido por la Norma Oficial Mexicana “NOM-025-SSA-2021”, que es de 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Un análisis preliminar entre la concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con datos del OAM, muestra que la concentración de $PM_{2.5}$ puede estar por encima de la normatividad, por lo que el problema a la salud que pueden causar las partículas suspendidas en Morelia podría ser más relevante de lo que sugieren los promedios anuales de PM_{10} . Por otra parte, se rebasó el límite establecido por la OMS, 2021, que es de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en un total de 63 días a lo largo de este periodo.

Se encontró que existe un patrón de variación mensual en las concentraciones de PM_{10} , con valores altos durante la temporada seca y cálida, valores bajos durante la temporada de lluvias y valores intermedios durante los meses correspondientes a otoño e invierno. Lo cual puede ser explicado en cierta medida por un aumento de los incendios forestales y agrícolas durante la estación seca y cambios en el tiempo de residencia de las partículas suspendidas por efectos de la humedad atmosférica y su influencia sobre el depósito de las partículas, siendo mayor este depósito durante la estación de lluvias o durante los días con mayor humedad atmosférica.

En el caso de la variabilidad diaria, no se encontraron diferencias significativas a lo largo de la semana, lo que sugiere que las emisiones generadas por las actividades de la población son similares entre días de la semana (o no varían de manera relevante entre días).

Respecto a la variación diurna, las concentraciones de material particulado PM_{10} , presentaron un comportamiento similar que otras ciudades, siendo los principales picos de contaminación por las mañanas y descensos después del mediodía, siendo esto explicado por el proceso conocido como inversión térmica que determina los niveles de concentración de contaminantes en las capas más bajas de la atmósfera, durante las primeras horas de la mañana, aunado a la actividad poblacional matutina en las urbes, que incide en el incremento de las emisiones contaminantes.

La pandemia del COVID-19 cambió el comportamiento de las concentraciones de PM_{10} , durante el 2020, donde al implementarse cuarentenas, confinamientos, reducciones parcial y total de actividades económicas, reducción en los niveles de

producción y movilidad humana, disminuyeron así las emisiones de contaminantes y las concentraciones de material particulado en comparación con otros años.

El estudio de los patrones temporales de PM_{10} en Morelia, permite conocer el comportamiento de dichos contaminantes a diferentes escalas, así como su interacción con otros factores como lo son las variables meteorológicas que cumplen una función importante al momento de la acumulación o dispersión de contaminantes, aunado al comportamiento poblacional que permite relacionar los niveles de contaminación y emisión durante diferentes periodos.

El mantenimiento continuo de los equipos de medición de calidad del aire, en las diferentes estaciones de monitoreo de la ciudad de Morelia, Michoacán, permitiría aumentar la cantidad de datos obtenidos para análisis y mejorar el sistema de alerta temprana de la ciudad ante eventos de alta contaminación, incentivando así, a la creación de sistemas de comunicación y difusión más complejos y oportunos, que alimenten la red actual de monitoreo.

Este tipo de estudios permiten establecer medidas preventivas a la salud poblacional y ecosistémica, poniendo mayor énfasis en aquellas poblaciones vulnerables como lo son los niños, adultos mayores, mujeres embarazadas, personas con enfermedades crónicas, etc., esto durante los períodos de altos niveles de contaminación, que puedan repercutir en el bienestar de la población a corto, mediano o largo plazo.

12. Bibliografía

Aguirre-López, M.A.; Rodríguez-González, M.A.; Soto-Villalobos, R.; Gómez-Sánchez, L.E.; Benavides-Ríos, Á.G.; Benavides-Bravo, F.G.; Walle-García, O.; Pamanés-Aguilar, M.G. (2022). *Statistical Analysis of PM10 Concentration in the Monterrey Metropolitan Area, Mexico (2010–2018)*. *Atmosphere*, (13), pp. 297.

Aldunate, Pablo, Paz, Oscar, & Halvorsen, Kjetil. (2006). *Los efectos de la contaminación atmosférica por PM10 sobre la salud ciudad de La Paz - Bolivia (3650 m.s.n.m.)*. *Acta Nova*, 3(2), pp. 422-442.

Ayuntamiento de Valladolid. (2021). *Material particulado PM10/PM2,5*. Recuperado de: <https://www.valladolid.es/es/rccava/contaminantes/material-particulado-pm10-pm2-5#:~:text=El%20tiempo%20de%20vida%20en,de%201%20micra%20de%20di%C3%A1metro.>

Battroid, (2011). *Location Map of Michoacán Equirectangular projection, Geographic limits of the map: N: 20.49° N S: 17.85° N W: 103.83° W E: 99.88° W*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Morelia>

Bravo JL, Nava MM, Muhlia A (2000) *Relaciones entre la magnitud del valor máximo de ozono, la radiación solar y la temperatura ambiente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. *Contaminación Ambiental* 16(2), pp. 45-44.

Camilloni, I., Vera, C., & Argentina Ministerio de Educación, C. y. T.. (2007). *La atmósfera: Ciencias naturales*. Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología. pp. 2-16.

Chacón Rivera L. (2015). *Efecto de los incendios forestales sobre la calidad del aire en dos ciudades colombianas*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. pág - 75.

Chakrabartia B., Finea Philip M., Delfinob Ralph., Sioutasa Constantinos. (2004). *Performance evaluation of the active-flow personal DataRam PM_{2.5} mass monitor (Thermo Anderson pDR-1200) designed for continuous personal exposure measurements* *Atmospheric Environment*, Vol. 38. n3329-3340.

Comisión Nacional Forestal. (2023). *Precaución en Morelia Michoacán ante incendios forestales*. Gobierno del Estado de Michoacán. Consultar en: <https://cofom.michoacan.gob.mx/exhorta-cofom-a-extremar-precauciones-para-prevenir-incendios-forestales/>

Correa-García, A. (2018). *Informe anual de monitoreo atmosférico del centro histórico de Morelia*. México: H. Ayuntamiento de Morelia.

Corre-García, A. (2022). *Contaminación atmosférica y meteorología en Morelia, Michoacán México. Una década evaluando la atmósfera urbana de la ciudad de Morelia*. Editorial Académica Española. pp. 49 - 62.

Diario Oficial de la Federación (DOF, 2021). Norma Oficial Mexicana de salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación (NOM-025-SSA1-2021). Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0

Dirección de Medio Ambiente y Sustentabilidad. (DMAS, 2017). *Informe Anual de Monitoreo del Aire en Morelia Michoacán*. Secretaría de Desarrollo Metropolitano e Infraestructura. Ayuntamiento de Morelia. Recuperado de: <http://bios.biologia.umich.mx/monitoreo.html>.

EPA. (1999). *Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air*. Continuous Measurement of PM-10 suspended particulate matter (SPM) in ambient air. EPA/625/R-96/010a.

Espinosa Carraso, L. A., & Li Ng, J. J. (2022). México | ¿El confinamiento por COVID-19 redujo la contaminación del aire? En BBVA research (N.o 22/09). BBVA research. Recuperado 20 de abril de 2023, de https://www.bbva.com/wp-content/uploads/2022/10/WP_22-09_Calidad_del_aire_COVID19_Mexico.pdf

Fierz-Schmidhauser R., Zieger P., Wehrle G., Jefferson A., Ogren J., Baltensperger U., Weingartner E. (2010): "Medición de la dispersión de luz de aerosoles dependiente de la humedad relativa". Técnicas de medición atmosférica, vol. 3, Número 1, 39-50.

Fonseca-Hernández, Mariam, Iryna Tereshchenko, Yandy G. Mayor, Arturo Figueroa-Montaño, Osvaldo Cuesta-Santos, and Cesar Monzón. (2018). "Atmospheric Pollution by PM10 and O3 in the Guadalajara Metropolitan Area, Mexico" *Atmosphere* 9, no. 7, pp. 243.

Gallego Picó, A., González Fernández, I., Sánchez Gimeno, B., Fernández Hernando, P., Garcinuño Martínez, R. M., Bravo Yagüe, J. C., Pradana Pérez, J. A., García Mayor, M. A., & Durand Alegría, J. S. (2012). *Contaminación atmosférica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid. pp. 64-88

Gianre L. (2021). *Contaminación atmosférica en Córdoba: el aire es aceptable, pero no todo el tiempo ni en todas las zonas*. UnCienca. Recuperado de: <https://uncienca.unc.edu.ar/medioambiente/contaminacion-atmosferica-en-cordoba-el-aire-es-aceptable-pero-no-todo-el-tiempo-ni-en-todas-las-zonas/>

Gonce-Rangel, A. (2014). *Determinación de los niveles de exposición a Monóxido de Carbono y Partículas PM2.5, en los usuarios del transporte público del periférico de la*

ciudad de Morelia, evaluando dos tipos diferente de transporte. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Química. Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Informe final de tesis de grado. pp. 149.

Gutiérrez Ayala, I. T. (2019). *Proyecto de Reciclaje e integración de la planta central aceitera Tron hermanos en Morelia, Michoacán*. [Especialidad no publicada].

Hayas-Barrú A. (1991). *Meteorología y contaminación atmosférica. Peculiaridades de la zona urbana de Jaén*. Boletín del Instituto de Estudios Giennenses, ISSN 0561-3590, N°. 143, págs. 191-200

Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). (2019). *Guide to Global Burden of Disease (GBD) VizHub*. Consultado en: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>

Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN), (2019). *Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Morelia, Michoacán 2019–2039* (N.º1). Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). Recuperado de: <https://implanmorelia.org/virtual/tema/pmdu-2019-2039/>

Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2010). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, Morelia, Michoacán*. Secretaría de Gobernación (SEGOB). Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16053a.html>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2010). *Estudio de emisiones y actividad vehicular en Morelia, Michoacán*. SEMARNAT.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2019). *Estado de la Calidad del Aire en México*. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/inecc/es/articulos/estado-de-la-calidad-del-aire-en-mexico?idiom=es>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2000). Michoacán: XII Censo General de Población y Vivienda 2000, Consultado: 15 de abril 2021.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2021). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Morelia, Michoacán de Ocampo*. Consultado: 20 de abril 2021.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2022). *Vehículos de Motor Registrados en Circulación*. Consultado: 12 de febrero de 2023.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2017). *Partículas en suspensión*. Gobierno de España. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/particulas.aspx>

NASA. (2016). Fire Information for Resources Management System (FIRMS), Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). Consultado en: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/firms#:~:text=The%20Fire%20Information%20for%20Resource,the%20Suomi%20National%20Polar%20Orbiting>

Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado*. Recuperado de: <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>

Organización Mundial de la Salud. (OMS, 2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. Recuperado de: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Perez Cejuela Sanchez J. L. (s.f). Calidad del aire: Partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2.5}). Ayuntamiento de Madrid.

Querol, X. (2008). *Calidad del aire, partículas en suspensión y metales*, Revista Española de Salud Pública: 82(5), pp. 447-453.

Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A. M., Amato, F., Catacolí, R. A., Rojas, N. Y., & de la Rosa, J. (2018). *Chemical composition and source apportionment of PM10 at an urban background site in a high-altitude Latin American megacity (Bogota, Colombia)*. Environmental Pollution, 233, pp. 142–155

Ramos-Herrera, S., Bautista-Margulis, R., & Valdez-Manzanilla, A. (2010). *Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México*. Universidad y Ciencia, 26(1).

Reina J. & Olaya J., (2013). *Ajuste de curvas mediante métodos no paramétricos para estudiar el comportamiento de contaminación del aire por material particulado PM₁₀*. Revista EIA, 23(3), 3-10. ISSN 1794-1237

Rojano, Roberto, Pérez, Jhonny, & Freyle, Edesnel. (2012). *Efecto de la humedad relativa en la determinación de PM10 utilizando un DataRam 4, en una zona costera de Colombia*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 35(2), 204-212.

Recuperado en 31 de julio de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702012000200010&lng=es&tlng=es.

Romero, M., F. Diego y M. Álvarez. (2006). *La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud*. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología, Cuba: 44(2), pp. 1-14.

Secretaría Distrital de Ambiente Bogotá, (SDA). (2021). *Inversión térmica: qué es y cuál es su relación con la calidad del aire*. Gobierno de Bogotá. Consultado en: https://ambientebogota.gov.co/de/historial-de-noticias/-/asset_publisher/VqEYxdh9mhVF/content/inversion-termica-que-es-y-cual-es-su-relacion-con-la-calidad-del-aire

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2023). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe anual 2020*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

Subsistema Estatal de Información de Calidad del Aire (SEICA). (2021). *Históricos de calidad del aire de PM₁₀ en la ciudad de León, Guanajuato*. Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial de Guanajuato. 2023. Consultado en: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/seica/historicos/leon>

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático. (SEMARNACC 2015). *Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en el estado de Michoacán 2015-2024 (ProAire)*. México. pp. 33-40.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales, SEMARNAT. (2019). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*, edición 2018. SEMARNAT. México.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales, SEMARNAT. (2019). *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio INEM*. SEMARNAT. México.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales, SEMARNAT. (2020). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*, edición 2019. SEMARNAT. México.

Thermo Fisher Scientific. (2007). *Instruction Manual Continuous Ambient Particulate Monitor FH62C14*. Franklin: Thermo Fisher Scientific Inc.

Tzintzun, M.G., L. Rojas y A. Fernández. (2005). *Las partículas suspendidas en tres grandes ciudades mexicanas*, *Gaceta ecológica*: 74, 15-28.

US-EPA 2008. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II: Ambient Air Quality Monitoring Program. U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Assessment Division. Research Triangle Park, NC, USA. Report No.: EPA-454/B-08-003

Vázquez, Carlos, Beristain, Fernando, & Audelo, Estela. (2012). *Caracterización del Patrón de Comportamiento de las Partículas en Suspensión en el Valle de México*. Información tecnológica, 23(3), 3-10. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000300002>

Zuk, M., Tzintzun Cervantes, M. G., & Rojas Bracho, L. (2007). *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas*. T(Primera ed.). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología